

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**STROJNÍ
FAKULTA**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2024

**ONDŘEJ
PROŠEK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Prošek** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **483132**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**
Specializace: **Energetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Ekonomické zhodnocení investice na využití odpadního tepla v sušící sekci papírenského stroje

Název diplomové práce anglicky:

Economic evaluation of the technology for waste heat utilisation in the drying section of the paper machine

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte diplomovou práci na výše uvedené téma. Jedná se o použití výměníku pára - vzduch pro ohřev sušícího vzduchu papírenského stroje pro využití zbytkové páry, kterou nevyužije sušící kaskáda.

- 1) zpracujte celkovou rešerši vývoje výroby papíru od starověku až po současnost,
- 2) zpracujte celkovou rešerši vývoje konstrukce papírenských strojů od středověku až po současnost,
- 3) zpracujte celkovou rešerši energetické náročnosti výroby papíru,
- 4) zpracujte energetickou bilanci rekuperačních věží pro víceválcový papírenský stroj,
- 5) navrhnete technické řešení pro využití úspor tepla ve formě brýdové páry,
- 6) vyčíslete roční úspory tepla u každé rekuperační věže ve finančních jednotkách (úspora topné páry, chladící vody, atd.),
- 7) popište možné scénáře provozních úspor,
- 8) vypracujte citlivostní analýzu pro provozní úspory,
- 9) vypracujte celkové ekonomické zhodnocení investice pro využití odpadního tepla.

Seznam doporučené literatury:

Sazima M., Kmoníček V., Schneller J. a kol.: Teplo, SNTL Praha 1989
Kalčík J.: Technická termodynamika, ČSAV Praha 1963

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Martin Neužil, Ph.D. ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **15.04.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.06.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2025**

Ing. Martin Neužil, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlašuji, že jsme diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

Bc. Ondřej Prošek

30.05.2024

Anotační list

Jméno autora: Ondřej

Příjmení autora: Prošek

Název práce česky: Ekonomické zhodnocení investice na využití odpadního tepla v sušící sekci papírenského stroje.

Název práce anglicky: Economic evaluation of the technology for waste heat utilisation in the drying section of the paper machine.

Rozsah Práce:

počet stran: 80

Počet obrázků: 59

Počet tabulek: 23

Počet příloh: 2

Akademický rok: 2023/2024

Jazyk práce: český

Ústav: energetiky

Studijní program: energetika a procesní inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Martin Neužil, Ph.D.

Anotace česky: Práce se zabývá využitím odpadního tepla v sušící sekci papírenského stroje. Odpadní teplo ve formě brýdové páry z kaskády sušící sekce je použito pro předehřev sušícího vzduchu, tím se ušetří ostrá pára, která je pro předehřev používána. Práce se zaměřuje na množství ušetřené energie, ekonomické hodnocení projektu a potenciální návratnost.

Klíčová slova: úspora energie, papírenský stroj, ekonomické hodnocení

Anotace anglicky: The work deals with the use of waste heat in the drying section of the paper machine. Waste heat in the form of flash steam from the cascade drying section is used to preheat the drying air, thereby saving live steam that is used for preheating. The work focuses on the amount of energy saved, the economic evaluation of the project and the potential investment return.

Klíčová slova anglicky: energy saving, paper machine, economic evaluation

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinu Neuzilovi, Ph.D. za jeho perfektní vedení práce, ochotu při řešení problémů a za cenné rady jak k diplomové práci, tak do profesního života.

Dále bych chtěl poděkovat za psychickou podporu rodině, přítelkyni a přátelům, bez které by diplomová práce nevznikla.

Obsah

Úvod.....	10
1. Historie papíru	11
1.1. Historie vzniku papíru.....	11
1.2. Historie materiálů potřebných pro výrobu papíru.....	13
1.3. Ruční výroba papíru.....	14
2. Moderní technologie výroby papíru	20
2.1. Moderní technologie výroby papíroviny.....	20
2.1.1. Výroba buničiny chemickými procesy.....	20
2.1.2. Bělení.....	22
2.1.3. Plnidla.....	22
2.1.4. Klíždla	22
2.1.5. Barviva.....	23
2.2. Papírenský stroj.....	23
2.2.1. Nátokové zařízení.....	24
2.2.2. Sítová část	25
2.2.3. Lisovací část.....	27
2.2.4. Sušící část	29
2.2.4.1. Faktory ovlivňující sušení.	30
2.2.4.2. Konstrukce sušících válců.....	31
2.2.4.3. Topná zařízení papírenského stroje.	33
2.2.5. Chlazení a hlazení.....	35
2.2.6. Navíjecí zařízení.....	36
2.2.7. Závěrečné práce	37
2.3. Energetická náročnost výroby papíru.....	37
2.3.1. Úvod	37
2.3.2. Spotřeba energie.....	38
2.3.3. Možnosti úspor	40
Praktická část.....	42
3. Úvod.....	42
4. Analýza současného stavu.....	42
4.1. Lokace.....	42
4.2. Popis stroje.....	43

4.3.	Rekuperační věž č.1	44
4.3.1.	Popis.....	44
4.3.2.	Schéma rekuperační věže č. 1.....	44
4.4.	Rekuperační věž č.2	45
4.4.1.	Popis.....	45
4.4.2.	Schéma rekuperační věže č. 2.....	45
4.5.	Rekuperační věž č.3	46
4.5.1.	Popis.....	46
4.5.2.	Schéma rekuperační věže č. 3.....	46
5.	Technické řešení použití brýdové páry a energetická bilance rekuperačních věží.....	47
5.1.	Technický popis upgradu rekuperačních věží.....	47
5.1.1.	Definice odpadního tepla ve formě brýdové páry	47
5.2.	Předpoklady.....	47
5.3.	Rekuperační věž č. 1	48
5.3.1.	Vstupní hodnoty.....	48
5.3.2.	Postup výpočtů.....	49
5.4.	Rekuperační věž č. 2	51
5.4.1.	Vstupní hodnoty.....	51
5.4.2.	Výpočty.....	51
5.5.	Rekuperační věž č. 3	52
5.5.1.	Vstupní hodnoty.....	52
5.5.2.	Výpočty.....	52
6.	Stanovení a vyčíslení možných úspor	53
6.1.	Vytipování druhů úspor.....	53
6.2.	Úspora ostré 3barové páry	54
6.3.	Výroba elektrické energie z uspořené tepelné energie.....	54
6.3.1.	Výpočet termodynamické účinnosti	55
6.4.	Úspora vody pro kondenzaci brýdové páry	56
6.5.	Vyčíslení úspor jednotlivých variant věže č. 1	57
6.5.1.	Úspora A (úspora ostré 3barové páry).....	57
6.5.2.	Úspora B (výroba elektrické energie z uspořené tepelné energie).....	57
6.5.3.	Úspora C (úspora vody pro kondenzaci brýdové páry).....	57
6.6.	Vyčíslení úspor jednotlivých variant věže č. 2	58

6.6.1.	Úspora A (úspora ostré 3barové páry).....	58
6.6.2.	Úspora B (výroba elektrické energie z uspořené tepelné energie).....	58
6.6.3.	Úspora C (úspora vody pro kondenzaci brýdové páry).....	58
6.7.	Vyčíslení úspor jednotlivých variant věže č. 3	59
6.7.1.	Úspora A (úspora ostré 3barové páry).....	59
6.7.2.	Úspora B (výroba elektrické energie z uspořené tepelné energie).....	59
6.7.3.	Úspora C (úspora vody pro kondenzaci brýdové páry).....	59
6.8.	Popis ideálních scénářů úspor	60
6.8.1.	První ideální scénář celkových úspor	60
6.8.2.	Druhý ideální scénář celkových úspor.....	60
6.8.3.	Třetí ideální scénář celkových úspor	60
6.9.	Vyčíslení úspor jednotlivých scénářů na papírenském stroji PM5	60
6.9.1.	Vyčíslení úspor ideálního scénáře č. 1	61
6.9.2.	Vyčíslení úspor ideálního scénáře č. 2	61
6.9.3.	Vyčíslení úspor ideálního scénáře č. 3	62
6.9.4.	Diskuse výsledků	62
7.	Citlivostní analýza	63
7.1.	Uspořená ostrá 3barová pára.....	63
7.2.	Cena elektrické energie	64
7.3.	Cena páry	66
7.4.	Cena vody.....	67
7.5.	Diskuze výsledků	68
8.	Ekonomické zhodnocení	69
8.1.	Popis reálných scénářů	69
8.1.1.	Optimistický scénář.....	69
8.1.2.	Realistický scénář	69
8.1.3.	Pesimistický scénář	69
8.2.	Vyčíslení realistických scénářů.....	70
8.2.1.	Optimistický scénář.....	70
8.2.2.	Realistický scénář	70
8.2.3.	Pesimistický scénář	71
8.3.	Zhodnocení investice	71
8.3.1.	Návratnost investice	71

8.3.2. Diskuze výsledků	71
9. Závěr.....	73

Úvod

Papírenský průmysl je jedním z důležitých a velmi rozvinutých průmyslů. Celkové množství vyrobeného papíru v roce 2022 dosáhlo 414 milionů tun. Se stávajícími trendy honu za udržitelnými obaly a snadno recyklovatelnými materiály se čeká, že poptávka po výrobcích z papíru nadále značně poroste. Energetická náročnost výroby celulózy a papíru není malá. Jen za rok 2021 bylo spotřebováno 1361 PJ energie a v roce 2022 byl papírenský průmysl zodpovědný za 2 % všech emisí z průmyslu. Z důvodu náhlého zvýšení cen energií a tlaku společnosti na snižování emisí je stále větší poptávka po jakýchkoliv možných opatření, která by snižovala energetickou náročnost výroby papíru.

Nejvíce energeticky náročná část výroby papíru je její sušení v sušící sekci papírenského stroje. V tomto procesu se využívá pára k otáčení válců, které následně suší procházející list papíru na požadovanou vlhkost. Tepelná energie představuje 2/3 spotřebované energie při výrobě papíru, z toho 75 % je spotřebováno právě v sušící sekci. Z tohoto důvodu má i zdárně malá úspora tepla v sušící sekci velký vliv na celkovou spotřebu.

Cílem této práce je ekonomické zhodnocení a odhadnutí návratnosti investice na využití odpadního tepla k předehřevu vzduchu v sušící sekci papírenského stroje. Odpadní teplo je v našem případě mařená brýdová pára. Toto teplo můžeme využít k předehřevu nasávaného nového vzduchu.

Součástí práce je tepelná bilance rekuperačních věží, vytipování možných druhů úspor, jejich finanční vyčíslení a citlivostní analýza. Práce dále obsahuje optimistický, realistický a pesimistický scénář návratnosti investice s následným odhadnutím návratnosti v čase.

1. Historie papíru

1.1. Historie vzniku papíru

Už od vynálezu písma bylo nutné vytvořit také materiál ke psaní. Když nepočítáme nástěnné malby na stěnách jeskyň, tak nejstarší zmínky nás zavedou do Mezopotámie 4000 let př.n.l., kde zdejší kultura psala klínovým písmem na hliněné destičky. O kousek dále zase staří Egypťané kolem roku 3000 př.n.l. vyráběli papyrus. Papyrus byla první uměle zpracovaná organická látka, která nahradila kámen a hlínu. Papyrus se vyráběl ze stébla šáchoru papírodárného (*Cyperus papyrus*).



Obr. 3. Hliněná destička s klínovým písmem



Obr. 2. Šáchor papírodárný (*Cyperus papyrus*)

Stvolky této rostliny se následně oloupaly ze svrchní tuhé zelené vrstvy. Získaná bílá dřevň rostliny se podélně rozřezala na tenké proužky a následně se několik dní máčela ve vodě, aby ztratila křehkost. Poté se proužky skládaly těsně vedle sebe a na ně se napříč skládala další vrstva. Vrstev mohlo být několik podle toho, jak měl být papyrus silný.



Obr. 1. Papyrus

Následně se papyrus tloukl, lisoval a hladil, přitom se poskládané proužky spojily a vytvořily celistvou strukturu. Archy se dále mohly lepit k sobě a tvořit svitky. [1], [2]

Později, někdy mezi druhým a prvním tisíciletím před Kristem, se začíná objevovat pergamen. Pergamen se vyráběl z kůže ovcí, koz, telat nebo ještě nenarozených jehňat. Byl proto pevnější, trvanlivější, ale dražší než papyrus. Výroba se skládala z několika kroků. Prvním krokem bylo zbavení kůže chlupů a blan. Dále se kůže loužila ve vápenném mléce (hydroxidu vápenatém) pro zbavení veškerého tuku. Po zbavení



Obr. 4. Pergamen napnutý na dřevěném rámu

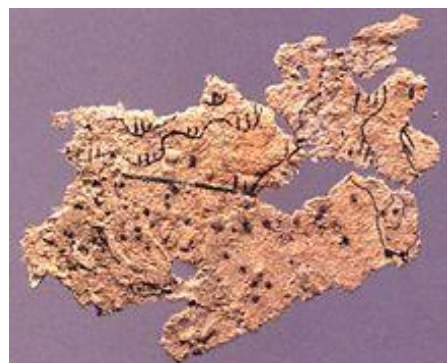
tuku se kůže vyčistila, zbrousila a pečlivě vypínala na dřevěných rámech. Po vysušení vznikl jemný, hladký, vláčný, tenký pergamen. Pergamen se v Evropě používal až do 17. století, ale jen pro specifické účely, protože cena pergamenu byla až 20x dražší než výroba papíru. [3]



Obr. 5. Listina z jemného pergamenu

Na druhém konci světa, konkrétně v Číně, vznikalo v 2. tisíciletí před Kristem další velké středisko kultury. Číňané vyvinuli vlastní písmo a ke psaní nejprve používali listy rostlin, kůru stromů, bambusové tyčky a později i hedvábné stuhy.

Vznik papíru, jak ho známe dnes, se datuje zhruba do roku 105 n. l. právě v Číně. Zde čínský ministr Cchaj Lun vytvořil papírovou hmotu vyrobenou buď z lýka větví moruše, nebo z konopných vláken. Tuto hmotu pak dále vлил na bambusovou síť, následně byla odceděna voda a vznikla zhuštěná vrstva vláken (mokrý arch papíru). Arch mokrého papíru se nechal volně vysušit a pote se lisoval. [4], [5], [6]



Předpokládá se, že tímto způsobem byl pravděpodobně vytvořen první papír podobný tomu, který používáme dnes. Existuje řada literárních pramenů, které popisují různorodost výroby tohoto papíru, avšak v základním konceptu se shodují. Můžeme se také dočíst, že historie papíru v Číně sahá mnohem dál do minulosti, avšak za počátek vzniku dnešního typu papíru je považováno právě toto období.

I přesto, že si Čína dlouho udržovala tajemství výroby papíru, se tato znalost nakonec rozšířila do celého světa. Nejprve se papír dostal do Japonska a Koreje, poté se pomocí karavan rozšířil do arabských zemí a následně i do Egypta. Z Egypta se pak znalost výroby papíru dostala do Evropy. První dílny na výrobu papíru vznikaly na území dnešního Španělska ve 12. století, následně vznikaly ve Francii, Německu a dalších zemích. V tomto období papír již zcela vytlačil pergamen. Do Čech se papír, podle písemně doložených materiálů, dostal roku 1499, pravděpodobně však již mnohem dříve. Historici vycházejí z toho, že papír



Obr. 7. Výroba papíru kolem roku 1570

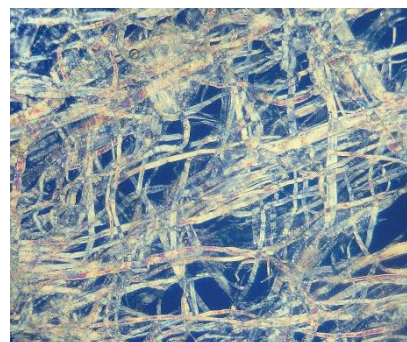
byl potřebný pro fungování Univerzity Karlovy v Praze a v době všeobecného rozkvětu království za císaře Karla IV. (Vláda Karla IV. 1346 až 1378, Rok založení University Karlovi 1348.) Velkým impulsem bylo vynalezení knihtisku v 15. století. K velkému rozkvětu papírenství v Čechách došlo na počátku 16. století, kdy u nás bylo založeno přes 20 papíren. V 17. a 18. století se v Českých zemích vyrábělo okolo 40 % veškeré produkce papíru zemí Habsburské monarchie. V 19. století ruční výrobu nahradila výroba strojní (v roce 1779 byla Louisem Robertem vynalezena strojová výroba papíru). [4], [7], [8]

1.2. Historie materiálů potřebných pro výrobu papíru

Mezi první historicky používané materiály pro výrobu papíru se řadily staré hadry, zbytky rybářských sítí, čínská tráva, rozdrčená hedvábná vlákna a později i rozdrčená kůra moruše papírenského. Od 9. století se dále využívalo konopí, rýžová sláma a staré hadry, především ty s velkým obsahem lna nebo bavlny. Používalo se takřka vše dostupné, co obsahovalo rostlinná vlákna. Právě hadrovina a recyklovaný papír byly základní surovinou až do 19. století. Papír tak vznikal zásadně recyklací a papírníci měli tehdy privilegium na sběr starých hadrů. [6]

S rozvojem papírnictví a stále větší poptávkou po papíru přestávala recyklace hadrů a starého papíru stačit. Hledaly se proto další suroviny bohaté na celulózní vlákna. Zkoušel se například mech, rašelina, kopřivy, cvikla atd. V polovině 19. století německý vynálezce Friedrich Gottlob Keller zaměřuje pozornost na dřevo. Jeho broušením na pískovcovém brusku získává vláknitou kaši, která se ukázala dokonalou pro výrobu papíru. Od roku 1845 se tak dominantním materiálem pro výrobu papíru stává dřevo. [6], [2]

Ne dlouho poté se zjistilo, jak dostávat celulózní vlákna ze dřeva chemickou cestou. Roku 1858 byla vynalezena chemická notronová buničina, která se vyráběla působením roztoku hydroxidu sodného na dřevo. V 70. letech 19. století byla pak vyvinuta sulfitová vláknina, která pro změnu využívala technologie vaření dřevěných štěpků v hydrogensířičitanu vápenatém. Od roku 1884 převládá technologie vaření štěpků v roztoku hydroxidu sodného a siřníku sodného za vzniku sulfátové buničiny. [6], [2]



Obr. 8. Buničina pod mikroskopem

Kromě základní suroviny se do papíru přidávají další příměsi, které zlepšují vlastnosti papíru:

- Plnidla (kaolín) – pro lepší stejnoměrnější vzhled
- Pojiva – pro lepší spojení papíru
- Klíždla – zamezují rozpíjení psacího nebo kreslicího prostředku
- Barviva – pro různé barvy papíru
- Optické zjasňovací prostředky
- Speciální přísady

1.3. Ruční výroba papíru

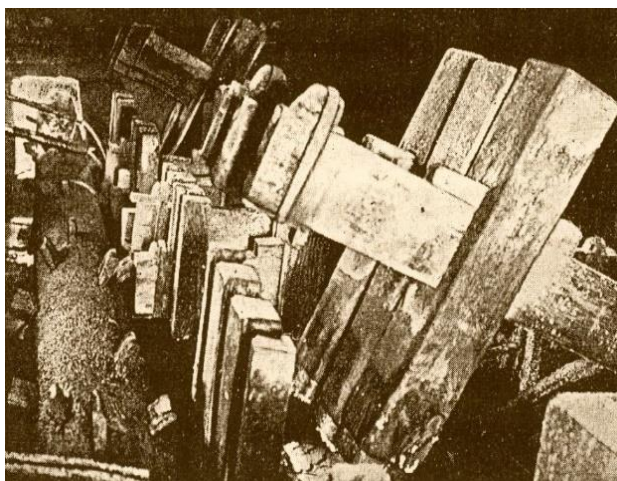
Až do roku 1799, kdy si Francouz Nicolas-Louis Robert nechal patentovat první papírenský stroj, se papír vyráběl pouze ručně. Ruční výroba s sebou nesla časovou i finanční náročnost na výrobu. I když se papír vyráběl ve velkém, nebyl tak všudypřítomný jako dnes. V 19. století strojová výroba papíru téměř vytlačila ruční výrobu papíru. Tato technologie se ovšem ze světa nevytratila a i dnes existuje přes 3 000 výrobců ručního papíru. Valná většina výrobců se nachází v Číně, dále v Thajsku a Indii. V Evropě evidujeme pouze 5 výrobců. V Čechách se zachovala pouze jedna výrobní ručního papíru, a to papírna ve Velkých Losinách, která byla založena v 16. století. [8],[5]

Prvním úkolem při výrobě papíru byla příprava primární suroviny, nejčastěji starých hadrů z bavlny, hedvábí či lnu. Hady se roztřídily, vypraly, nahrubo rozřezaly a nechaly sluncem vybělit. Poté prošly zhruba dvoutýdenním hnilobným procesem, aby změkly a dalo se s nimi lépe pracovat v pozdějších fázích výroby. Dále bylo potřeba surovinu rozložit a mechanicky rozmělnit, k čemuž sloužily takzvané stoupy. Ve stoupě se hmota zpracovávala nepřetržitě 12 až 18 hodin. Roku 1670 neznámý řemeslník v Holandsku vyrobil takzvaný holandr, stroj, který dokázal proces zkrátit na polovinu, a stal se tak nástupcem stoupy. [9], [10], [11]

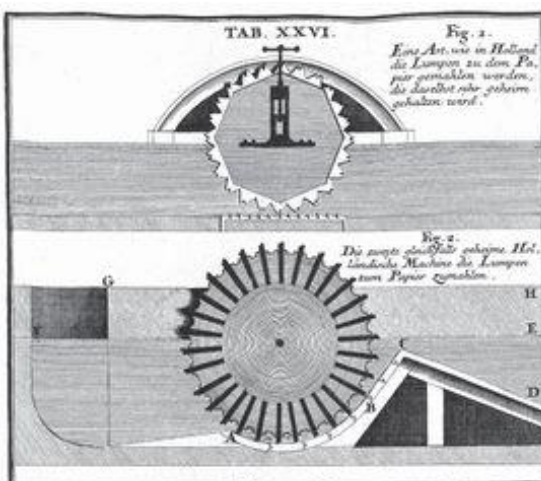
- **Stoupa** je tvořena sérií dřevěných nebo kamenných koryt, nebo kádí s vyztuženým dnem. V každé jedné kádi byla zhruba 4 těžká dubová nebo kovová kladiva, zavěšená na rovnoramenných pákách. Spodní část kladiv byla okována noži nebo hřeby, které pomáhaly drtit hadrovinu. K pohonu se používalo vodní či větrné kolo připojené přes hřídel ke stoupě. Pokud hadry před vložením do stoupy prošly dvoutýdenním hnilobným procesem, trvalo drcení 12 až 18 hodin. Pokud byl hnilobný proces přeskočen, čas potřebný na proces se vyšplhal až na 36 hodin. Pro zlepšení průběhu procesu byla do kádí nepřetržitě vháněna čistá voda. Znečištěná voda byla poté odváděna přes zadržovací odpadní mřížku zpět do potoka nebo jiného zdroje vody. Hotová polodrt' byla obohacena vápnem a poté zrála dva týdny v kádi nebo na hromadě. Poté se celý proces opakoval ještě jednou. Po dokončení druhého kola drcení vznikla celodrt' (dnešní název je papírovina). Nejstarší stoupy pochází z Itálie, okolo roku 1300. Velikost stoup se odvíjela od výkonu vodního či větrného kola. Velká papírna disponovala 15 až 30 stoupami, ale i přes velký počet zařízení se jednalo o nejdelší proces výroby papíru.

[9], [11]

- **Holandr** tvořila kád' a dvě soustavy nožů. První soustava nožů vyčnívala z vodorovného mlecího válce, který byl poháněn větrným či vodním kolem, stejně jako stoupa. Druhá soustava nožů byla u dna a směřovala proti té první. Proces probíhal za přítomnosti vody, přičemž spodní soustava nožů byla zcela ponořena do vody a mlecí válec jen částečně. Díky tomuto designu se dokázal proces drcení zkrátit na 9 hodin. U holandru se proces opakoval dvakrát, stejně jako u stoupy. Z doložených písemností víme, že holandr dokázal vyrobit v jednom dni tolik papíroviny jako osm stoup v osmi dnech. Tato technologie byla na svoji dobu tak revoluční, že si Holanďané tajemství holandru dlouho drželi v tajnosti, jako výhodu nad konkurencí. Holandr pronikl za hranici Holandska až na počátku 18. století a od té doby rychle vytlačoval stoupy. [10], [9]



Obr. 10. Stoupa



Obr. 9. Holand

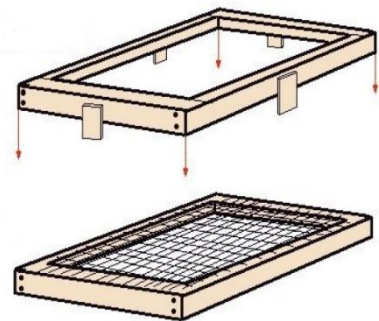
Vzniklá papírová kaše se částečně odvodnila vařením v kádí. Papírovina se dále žlaby přiváděla do čerpací kádě a odtud byla ručně nabírána na čerpací formu. Čerpací formu tvořil pravoúhlý lat'kový rám. Rám vyztužovala kolmá osnova z pevných mosazných drátů vzdálených od sebe 25 mm. Osnova byla hustě propletena útkovými dráty o rozteči 1 až 3 mm. Z důvodu, aby papírovina neztékala z okrajů rámu, se na formu přikládal ještě jeden volný rám o výšce 2 cm. Rozměry formy byly určovány obvykle podle principu zlatého řezu poměrem 3:5, 5:8, 8:13 atd. Zaměstnanec papírny, pověřený výrobou a opravou sít, se nazýval formař. [12]

Pracovník zvaný čerpač nebo naběrač ponořil čerpací formu do kádě s papírovinou a nabral tolik papíroviny, kolik bylo potřeba k výrobě jednoho archu papíru. Krouživými pohyby

usměrnil orientaci vláken ve formě a urychlil odvodnění. Poté sejmul volný rám z formy a plnou formu přesunul ke skládači. Skládač překlopil formu na plstěnc a prázdnou formu podal zpátky naběrači. Plstěnc byla pevná, poddajná a savá vložka z plsti či vlněného sukna a sloužila nejen k odkládání, ale i k částečnému odvodnění. Jakmile skládač vyrovnal 181 archů, byla vytvořena takzvaná pušť. Pušť byla opatřena dvěma dřevěnými deskami seshora a zespoda a následně vložena do papírenského lisu. Poté co byla pušť zalisována, pracovník, zvaný snímač, pušť rozebral a roztřídil na sloupek papírů a plstěnců nebo také na pušť bílou a pušť černou. Obě puště poté ještě jednou prošly lisem. Z plstěnců se tak vylisovala přebytečná voda a byly připraveny na další použití. Archy papíru se opětovným lisováním zpevnily natolik, aby snesly následnou manipulaci a sušení. [13], [14]

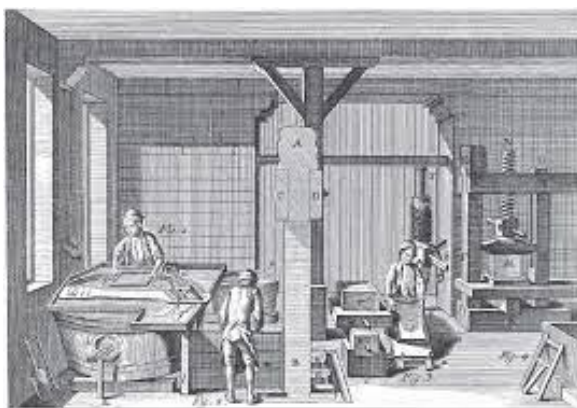


Obr. 12. Kád s papírovinou (modernější)



Obr. 11. Čerpací forma na papír

- **Ruční papírenský lis** kopíroval lisy na olivy. Lis se skládal ze dvou masivních dřevěných sloupů, které byly ze spodu zapuštěny do podstavce a nahoře spojeny příčným břevnem. V břevnu se pohybovalo vřeteno zakončené objímkou. Ta nesla tlakovou desku, která silou odvodňovala, stlačovala a vyrovnávala sloupec papíru. Deska se dle potřeby vysouvala nebo snižovala pohybem vřetene. Vřeteno se otáčelo pomocí páky vsunuté do objímky. U papírenského lisu bylo důležité, aby tlaková deska setrvala v co nejnižší poloze. Z toho důvodu byl u objímky instalován ozubený kotouč s jisticí pákou, který zamezoval zpětnému pohybu vřetene. Papírenský lis obsluhovalo až 8 lidí. Ti museli vyvinout velkou sílu, aby byl proces lisování úspěšný. Pro usnadnění práce se mezi podlahu a strop montovala ještě kolmá hřídel, spojená s presní pákou silným provazem. Hřídel, otáčená jinou pákou, navíjela provaz, který dotahoval páku u lisu. [14]



Obr. 13. Postup práce nabírání papíroviny a lisování



Obr. 14. Ruční papírenský lis

Další fází na cestě k hotovému archu papíru bylo sušení. Lisováním se sice vytlačila z archu většina vody, ale aby mohl být papír použit, musel být dokonale suchý. Sušení probíhalo v několikapatrových půdách opatřených vikýři, které regulovaly proudící vzduch. Při sušení se veškerá voda z archů vypařovala do okolního ovzduší a tím se zvyšovala vlhkost ovzduší v sušárně. S rostoucí relativní vlhkostí vzduchu se účinnost sušení zmenšuje. Z tohoto důvodu bylo větrání prostoru velice důležité.

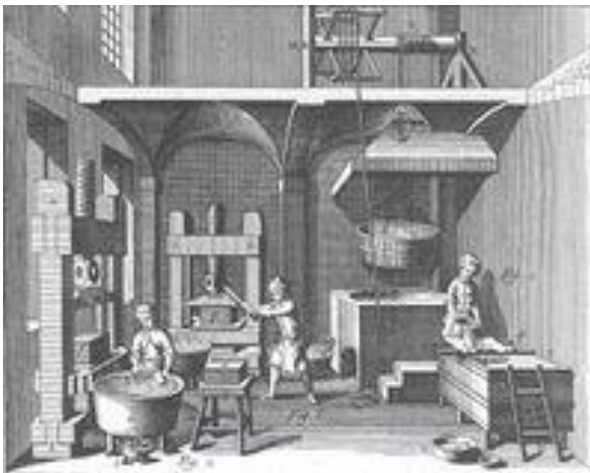
Pro věšení archů papíru sloužily žebříky s dlouhými tyčemi nebo napnuté šnůry, přes které se archy přehýbaly. Jde o stejný princip jako u věšení prádla na šňůru. Délku sušícího procesu dost ovlivňovaly aktuální klimatické podmínky. Tuto činnost většinou vykonávaly ženy. Jedna žena dokázala během 14 hodin rozvěsit až 37 000 archů papíru.

Po vysušení byly archy lehce zmuchlané a bylo nutné je ještě jednou vylisovat. K tomu sloužil takzvaný suchý papírenský lis. Suchý papírenský lis se svou konstrukcí nelišil od mokrého papírenského lisu, jen při jeho lisovací činnosti nebylo potřeba vynaložit takové tlakové síly. [15], [14]



Obr. 15. Sušení papíru

Dalším procesem ve výrobě papíru bylo klížení. Základní surovinou pro výrobu živočišného klišu byly šlachy, vazy nebo kůže. Většinou se využíval odpad z koželužen a papírny měly privilegium na odkup těchto surovin. Ve speciálních místnostech papíren se suroviny vařily v drátěném koši, který byl ponořený do měděného kotle s vroucí vodou. Klišový roztok byl po usazení přelit do zásobní nádrže, odkud se dle potřeby přelával a ředil v klížicí kádi. K samotnému klížení se používala takzvaná klížicí kniha. Klížicí kniha byla tvořena dvěma dřevěnými deskami, které byly spojené ve hřbetu řemínky. Velikost desek odpovídala rozměrům klížených listů. Klížilo se tak, že zkušený pracovník, většinou správce nebo majitel dílny, vzal klížicí knihu a volně do ní vložil až 25 archů papíru. Poté se knihou ručně, jako vějířem, mávalo v kádi tak, aby roztok zasáhl jednotlivé listy papíru. Po naklizení většího objemu archů se papír zbavil přebytečného klišu na speciálním papírenském lisu. Po vylisování archů se obvykle celý proces zopakoval. Postup byl stejný, ale do roztoku klišu se přidal kamenec. Kamenec sloužil ke zmírnění lepkavosti klišu a zlepšil odolnost proti rozpouštění písma. Po druhém kole klížení se papír znovu vylisoval a ještě jednou usušil. Psací papír se klížil rovnou v papírně, ale papír pro knihtisk nesměl být naklizen kvůli přilnavosti barvy. Tento papír klížili až knihvazači. Během 14 hodin bylo možno naklízit až 37 000 archů papíru. [16], [17]



Obr. 17. Klížení papíru



Obr. 16. Granulovaný klíš

Poslední fází výroby ručního papíru bylo hlazení. Hlazením se vyrovnaly drobné nerovnosti po posledním sušení. Do poloviny 16. století se hladilo jenom ručně za použití kovových hladítek nebo vybroušených achátů. Od tohoto data se začala objevovat metoda, která využívala mechanické kladivo dopadající na rovnou desku. Kladivo mělo většinou už vodní či větrný pohon. Od zavedení této technologie se papírny rozdělily na dva tábory. Na ty, co upřednostňovaly ruční hlazení, a na ty, co preferovaly mechanické hlazení. Toto rozdělení,

alespoň v Čechách, ukončilo až vydání papírenského řádu roku 1768. Tento řád sjednocoval postup výroby papíru a ruční hlazení zcela zakazoval pro jeho menší efektivitu. Němečtí papírníci užívali před rokem 1671 k hlazení jeden kovový válec. V holandru se od roku 1750 používaly dva kovové či mosazné válce. Tento papír se pak nazýval papier satiné. [18]



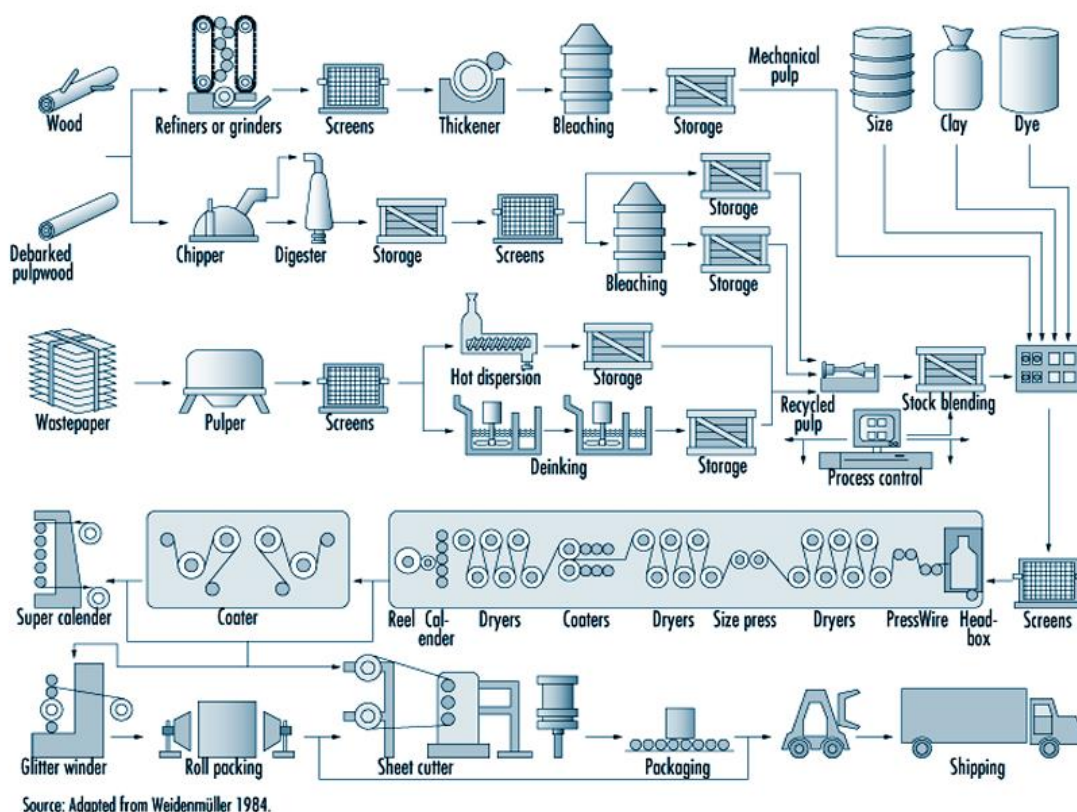
Obr. 18. Ruční hlazení papíru

Po poslední fázi výroby papíru byly archy papíru skládány do balíku a opatřeny papírnickou obchodní značkou. Tato značka představovala symbol identifikující papírnu a jejího majitele, druh papíru a formát. Do tiskáren se poté archy papíru expedovaly v bednách nebo sudech.

Výrobní proces papíru trval od svého prvopočátku 2 až 3 měsíce a prošel přes třicet výrobních úkonů, v nichž každý arch papíru prošel rukama řemeslníka několikrát.

Ruční papírna s jednou čerpací kádí vyrobila denně cca 3 000 archů. Toto číslo se postupem času navyšovalo s přibývajícím mechanizací. [9]

2. Moderní technologie výroby papíru



Obr. 19. Blokové schéma výroby papíru

2.1. Moderní technologie výroby papíroviny

2.1.1. Výroba buničiny chemickými procesy

Hlavní surovinou pro výrobu buničiny je ve 21. století dřevo. V České republice se používá dřevo z jehličnatých stromů (smrk nebo borovice). Při výrobě buničiny je zapotřebí pouze dřevní hmota v jakékoliv formě. Z tohoto důvodu se pro papírenské účely většinou nevyužívá celý strom, ale pouze vrchní části kmenů, dřevo z propírek nebo pilařská štěpka. Jinak řečeno, jde o sortiment dřeva, který se nedá zpracovat na řezivo nebo je odpadem při jeho zpracování. Z tohoto důvodu je výhodné mít u papírny i pilu, jako je tomu například u papírny Mondi Štětí.

Struktura jehličnatého dřeva je tvořena vlákny o délce 2,5-3,5 mm a šířce 30-38 μm . Buněčná stěna vlákna se skládá z polymeru celulózy, jehož stavební jednotkou je molekula glukopyranózy. Jednotlivá vlákna jsou pevně spojena ligninem. Lignin je na rozdíl od celulózy rozpustný v kyselinách i zásadách, čehož se využívá při výrobě buničiny. Další složky přítomné ve dřevě jsou hemicelulózy, polymery pentozanů a hexozanů, extraktivní látky na bázi mastných a pryskyřičných kyselin a terpeny. Z těchto látek během sulfátového procesu vznikají významné meziprodukty, které jsou dále zpracovávány v chemickém

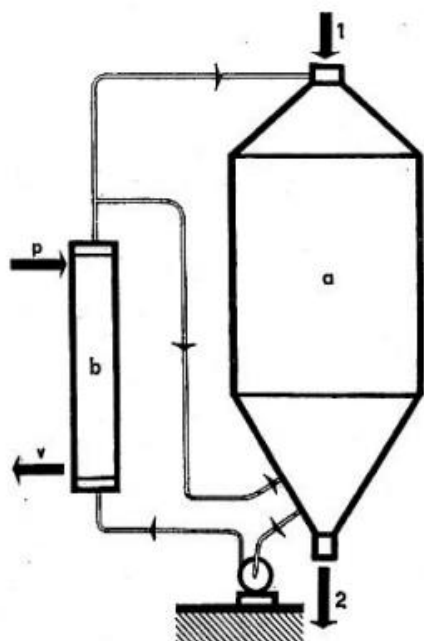
průmyslu a využívají se např. pro výrobu nátěrových hmot a lepidel. Volná vlákna jsou poměrně chemicky stabilní a po dalších úpravách se využívají k výrobě papíru.

Pro separaci buničiny ze dřeva se dnes v zásadě používají dvě chemické metody. Jedná se o sulfátový proces a sulfitový proces. [19]

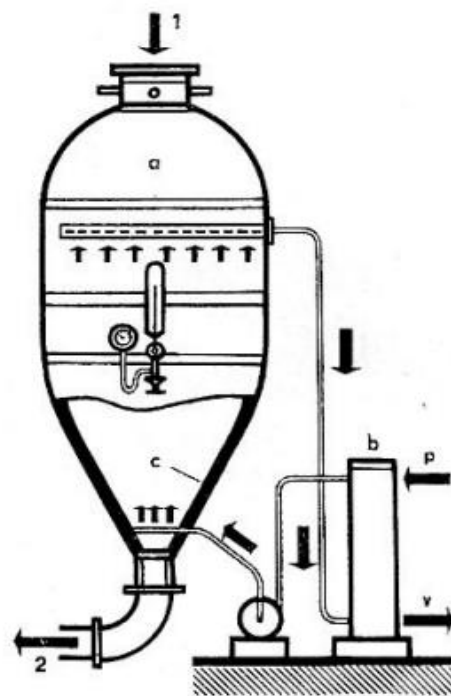
- **Sulfátový proces výroby buničiny**

V současnosti se jedná o dominantní technologii výroby buničiny, kterou se vyrábí cca 80 % světové produkce buničiny. Vlastní technologie používá k rozpuštění ligninu roztok hydroxidu sodného a sulfidu sodného. Tato směs je též označována jako bílý louh. Vstupní surovina nesmí obsahovat kůru a musí být nasekána na malé kousíčky. Štěpka poté vstupuje do tlakové nádoby společně s varným louhem, kde se za vysokého tlaku a teploty (150-170 °C) rozpouští lignin. Po ukončení várky se buničina tzv. vypere (oddělí se výluh označovaný jako černý louh) a vytřídí (oddělí se suky, neprovary a svazky vláken). Čistá buničina je poté ve formě vodolátky čerpána na papírenský stroj. Černý louh obsahující rozpuštěné organické látky se regeneruje zpátky na bílý louh a je znovu použit.

Sulfátově zpracovaná vlákna mají lepší trvanlivost ve srovnání s vlákny získanými jinými dostupnými technologiemi. Navíc sulfátový proces lze použít na všechny druhy dřeva a samotný proces umožňuje efektivní obnovu použitých chemických surovin. [19], [20]



Obr. 20. Schéma vařáku na sulfátovou buničinu s cirkulací varného louhu



Obr. 21. Schéma vařáku na sulfitovou buničinu s nepřímým topením (s cirkulací varné kyseliny)

- **Sulfitový proces výroby buničiny**

Na rozdíl od předešlé metody tato metoda používá vodný roztok oxidu siřičitého v přítomnosti alkálii, např. vápníku, hořčíku nebo sodíku. Tato technologie je náročnější na vstupní surovinu. Používá se pouze smrkové nebo jedlové dřevo s dlouhými bílými vlákny. Dřevo musí být pečlivě zbaveno kůr, lýka a suků. Inkrustační látky se odstraňují ze dřeva vařením pouze z části, aby se nepoškodilo celulózové vlákno. Doba vaření se liší podle množství inkrustačních látek. Po ukončení várky se odpadní varná kyselina (sulfitový výluh) shromažďuje ve sběrné nádrži. Kyselina se po neutralizaci vápnem vypouští do říčního toku nebo se může částečně zpracovávat na alkohol nebo droždí, zbytek jde opět do řeky. Buničina se po propláchnutí vodou vytřídí a potom putuje ve formě vodolátky na papírenský stroj. [19], [20]

2.1.2. Bělení

Při chemické výrobě buničiny sulfátovým či sulfitovým procesem zůstává v buničině zbytkový lignit a další látky, které buničinu zbarvují do hněda. Pro některé druhy papíru je potřebné, aby buničina byla čistě bílá (bělená buničina). Bělení je proces, který spočívá v aplikaci chemikálií, které reagují převážně s ligninem a co nejméně poškozují vlákna buničiny. Sem patří především kyslík, oxid chloričitý a peroxid vodíku. Bělení probíhá ve vícestupňových reaktorech vybavených pracím zařízením. [19], [21]

2.1.3. Plnidla

Plnidla jsou nerozpustné částice, které zaplňují prázdná místa ve struktuře papíru. Plnidla v papírovině se používají k zvýšení opacity (neprůsvitnosti), potiskovosti, popisovatelnosti, a také k získání bělejšího odstínu papíroviny. Rozdělují se na organická a anorganická. Mezi hlavní zástupce plnidel patří kaolín, mastek, uhličitan vápenatý, síran vápenatý, oxid titaničitý, křemičitan vápenatý, síran barnatý, lithopon nebo sulfid zinečnatý. Pro každý typ papíru se používají jiná plnidla v různém množství, podle potřeb finálního vzhledu. Např. bankovní a psací papír obsahuje 2 až 8 %, knihtiskové 4 až 12 % nebo ilustrační až 25 % plnidel. [22], [23]

2.1.4. Klíždla

Klížení papíroviny se provádí za účelem zamezení rozpíjení inkoustu na papíru. Dříve se papír klížil pouze povrchově, dnes se klíždla přidávají do papíroviny před vstupem do papírenského stroje. Ke klížení ve hmotě se používá buď klasických pryskyřic a talových klíždidel na přírodní bázi nebo tzv. zesílených klíždidel, případně různých směsí zesílených

klíždídel a parafinových disperzí, které se získávají z ropných produktů. Jako fixační prostředek se používá samotný síran hlinitý nebo příměs hlinitanu sodného. [24]

2.1.5. Barviva

Barvivo je látka schopná se za jistých podmínek vázat na jiné látky a udílet jim barvu. Základní rozdělení je na přírodní a syntetické. Mezi přírodní barviva řadíme indigo, alizarin nebo kurkumin. Syntetická barviva se vyrábí buď z černouhelného dehtu nebo z ropných produktů. Nejrozšířenějším způsobem barvení papíru je barvení papíroviny ve hmotě. Do hmoty papíroviny se zpravidla přidává roztok organického barviva zředěné v poměru 1:50 až 1:200 ve fázi plnění a klížení, čímž se dosahuje dobré fixace barviva a klíždíla. [23]

2.2. Papírenský stroj

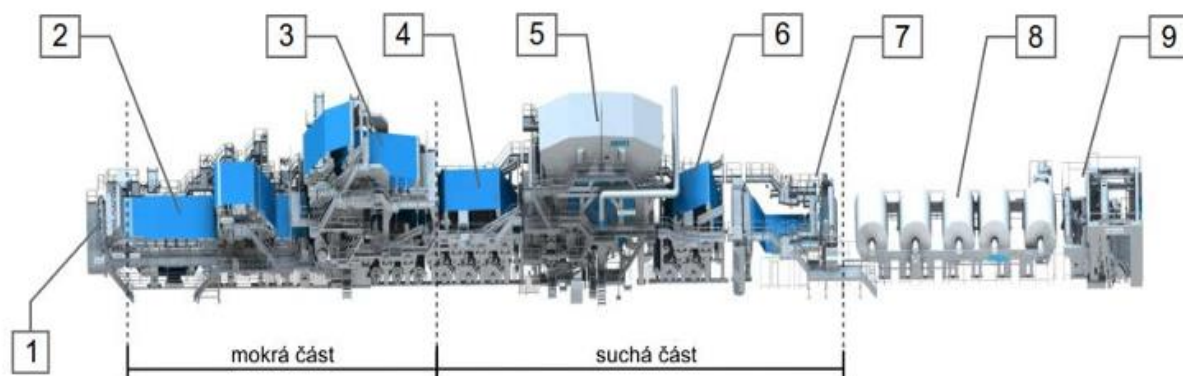
Papírenský stroj je zařízení na výrobu papíru, do něhož na jedné straně natéká papírovina a na jeho konci se na kotouč navíjí hotový strojní papír. To, co se při výrobě ručního papíru dělalo na mnoho úkonů, je dneska sloučeno v jednom komplexním stroji. Papírenských strojů je mnoho druhů a liší se jen v dílčích komponentech, podle druhu papíru, který vyrábějí. Dalo by se říct, že co papírenský stroj, to originál. I když je každý papírenský stroj trochu jiný, lze u každého rozeznat stejné dílčí části, které můžeme rozdělit na části konstantní a části variabilní. [25], [26]



Obr. 22. Moderní papírenský stroj

- **Konstantní část** je část stroje od strojní kádě až k nátoku. Konstantní část obsahuje čerpací kád' s papírovinou, čistící a ředící zařízení a nátok, jímž se suspenze v rovnoměrné vrstvě přivádí na síto papírenského stroje. [26]

- **Variabilní část** označuje část stroje od nátoku až po navíječ. Tato část se dá dále rozdělit na suchou část a mokrou část.
 - **Mokrý část** papírenského stroje začíná tzv. prsním válcem a je tvořena sítovou částí a lisovací částí. V této části dochází k přeměně papíroviny dodávané prostřednictvím nátokového zařízení v papírový list. Principem tohoto procesu je postupné mechanické odjímání vody z papíroviny. Odborně se tento proces nazývá odvodňování. [27], [25], [26]
 - **Suchá část** papírenského stroje začíná prvním sušícím válcem v sušící sekci a končí navíjecím zařízením. Význam této části spočívá v dosušení papírového pásu pomocí válců otápených procesní parou. Dále zde probíhá jeho případná úprava (chlazení, hlazení, krepování, řezání, vlhčení, zušlechťování atd.) a navíjení hotového výrobku na válec neboli tambor. [27], [25], [26]
- **Dílní příslušenství papírenského stroje** tvoří: čerpadla, třásáky, potrubí na surovou vodu, potrubí oběhové vody, parní a kondenzátní potrubí, potrubí na párou ohřátý vzduch k vytápění, pohon stroje, klimatizační zařízení, hlavní jeřáb, pomocné jeřáby atd. [26]



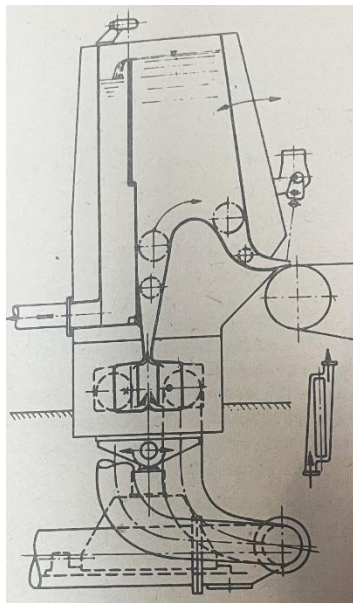
Obr. 23. Papírenský stroj 1 – nátokové zařízení; 2 – sítová část; 3 – lisová část; 4 – předsoušecí část; 5 – sušící část (Yankee); 6 – kalandr; 7 – navíjecí zařízení; 8 – tambory; 9 – převíjecí zařízení

2.2.1. Nátokové zařízení

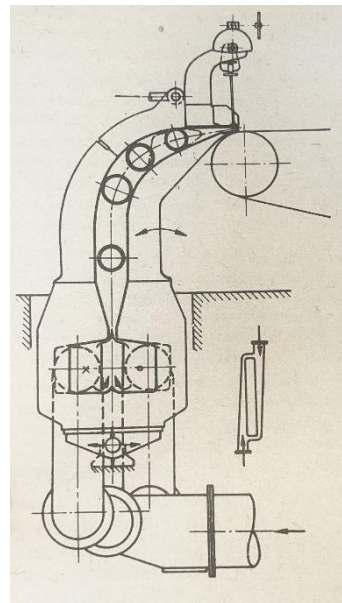
Před sítou papírenského stroje je umístěna nátoková skříň, do níž se přivádí papírovina. Toto zařízení slouží k přivádění papíroviny v rovnoměrné vrstvě a v požadované rychlosti na síto

papírenského stroje. Podle konstrukce nátokové skříně rozdělujeme zařízení na otevřené nebo uzavřené [27], [26]

- Otevřené nátokové zařízení se vyznačuje tím, že z ní papírovina vytéká na síto vlivem vlastního hydrostatického tlaku sloupce kapaliny daným výškou hladiny v nátokové skříně. Otevřené nátokové skříně se používaly hlavně u pomalejších starších strojů do rychlostí 300 m/min. [27]
- Uzavřené nátokové zařízení se vyznačuje tím, že potřebný tlak pro výtok papíroviny na síto se dodává čerpadlem nebo vzdušným polštářem nad hladinou papíroviny ovládaným kompresorem. Toto zařízení proto musí být uzavřené. Uzavřené nátokové skříně se dnes používají u všech papírenských strojů z důvodu mnoha výhod. Mezi výhody patří zejména automatická regulace plošné váhy a možnost rychlého měnění vyráběného papíru. Jedinou nevýhodou uzavřených nátokových skříní je špatné odplyňování papíroviny a následné tvoření pěnových skvrn na listu papíru. Proto je nutné papírovinu nejdříve různými způsoby odvzdušnit. [27]



Obr. 25. Otevřené nátokové zařízení



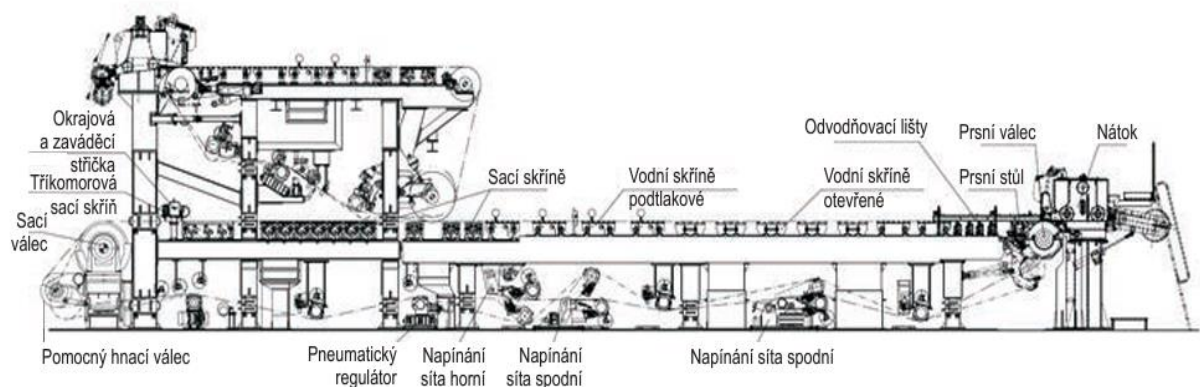
Obr. 24. Uzavřené nátokové zařízení

2.2.2. Sítová část

Sítová část papírenského stroje (obr. 26) slouží jako první stupeň odvodnění papíroviny a přemění jí na tzv. papírový list. Papírovina vytéká z nátokového zařízení na podélné nekonečné síto, kde dochází k odvodňování látky tak, že se vlákna usazují na povrchu síta.

Síto je natažené mezi dvěma válci, na začátku tzv. prsním válcem a na konci tzv. sacím válcem. V horní části mezi těmito válci se nacházejí odvodňovací prvky, které pomáhají s odvodněním. Odvodňovací prvky se na síťovém stole nacházejí v tomto pořadí: prsní stůl, odvodňovací lišty, otevřené vodní skříně, podtlakové vodní skříně, sací skříň. Délka síťové části závisí na výkonu papírenského stroje, na druhých papíru vyráběných na stroji a počtu odvodňovacích prvků. Je důležité zajistit požadované množství sušiny za sítem. [27]

Síto se, podobně jako textilní tkanivo, skládá z osnovy a útku. Síto se vyrábí z bronzu, z nerezového drátu nebo v dnešní době převážně z plastových materiálů. Síť je mnoho druhu, liší se způsobem zpracování nebo velikostí ok. Tyto rozdíly mají pak vliv na odvodňování listu papíru. [27]



Obr. 26. Síťová část papírenského stroje

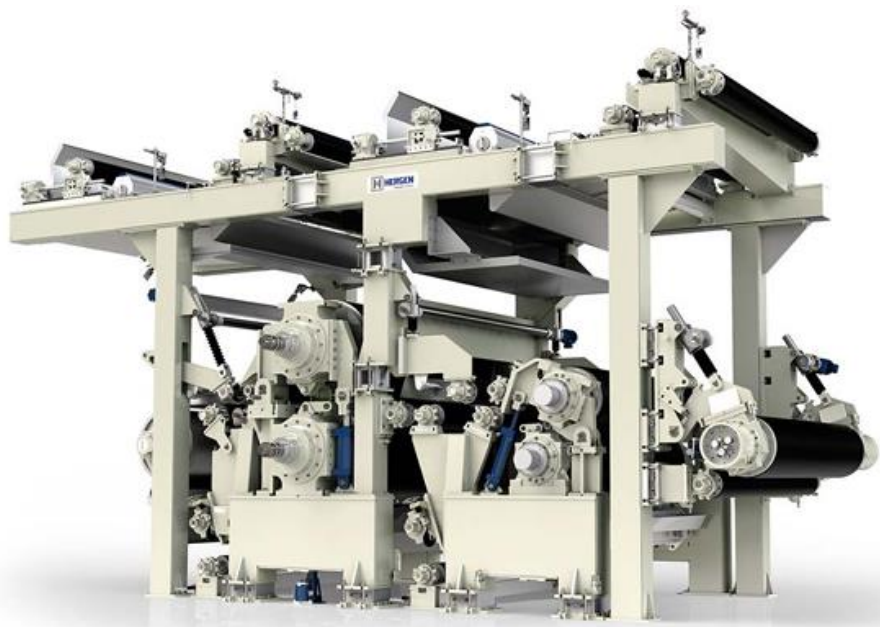
Odvodňovací prvky a jejich správné rozložení na sítu zajišťuje správné množství sušiny za síťovou částí. [27]

- Prsní stůl je svařenec z nerezové oceli, který je osazen lištami z keramiky nebo polyethylenu. Stůl se dá posunout vzhledem k prsnímu válci a je nastavitelný i výškově kvůli opotřebovávání lišt.
- Odvodňovací lišta je svařenec z oceli, který je připevněn na nosníky síťové části pomocí stojánku, který umožňuje výškové nastavení. Lišta je na vrcholu osazena lištou z polyethylenu nebo keramiky.
- Otevřená vodní skříň je svařenec z nerezové oceli, který je v přímém kontaktu se sítem a slouží k zachytu vody.

- Podtlaková vodní skříň je svařenec z nerezové oceli, který je v přímém kontaktu se sítím. Ve skříni je vytvářen podtlak, který zaručuje lepší odvodnění listu papíru a záchyt vody.
- Sací skříň je zpravidla nerezová a skládá se ze dvou částí – otevřené plochy, která je v kontaktu se sítím a uzavřené části. Obě části jsou propojené. Podtlak v sací skříni se vytváří vývěvou a je regulována podle potřeby.

2.2.3. Lisovací část

Lisovací část (obr. 27) je další ze série operací, která odvádí vodu z listu papíru. Papírenský stroj mívá zpravidla 1 až 6 lisů. Lisovací soustava jsou v principu dva na sobě ležící válce, mezi nimiž prochází papírový list nesený odvodňovacím plstěncem. Váha horního válce a zalisovacího zařízení vyvozuje lineární tlak mezi oběma válci a dochází tak k mechanickému odvodňování papírového listu. K zajištění vhodných vlastností papíru je nutné, aby k odvodňování docházelo postupně, což ovlivňuje jakost papíru. Obecně platí, že je ekonomicky výhodnější odebrat vodu z listu papíru mechanickou cestou než odpařovat vodu na sušících válcích. Každé procento sušiny dosažené v síťové a lisové části snižuje spotřebu páry na sušení v sušící části až o 5 %. Je tedy snaha maximalizovat odvodnění na lisech tím, že se zvětšuje lisovací síla. Lisovací síla ovšem nesmí být příliš velká, jinak způsobuje rychlé opotřebování válců, a to především na rychloběžných strojích. Z těchto důvodů se mezi oběma kritérii musí volit kompromis. [27], [26]



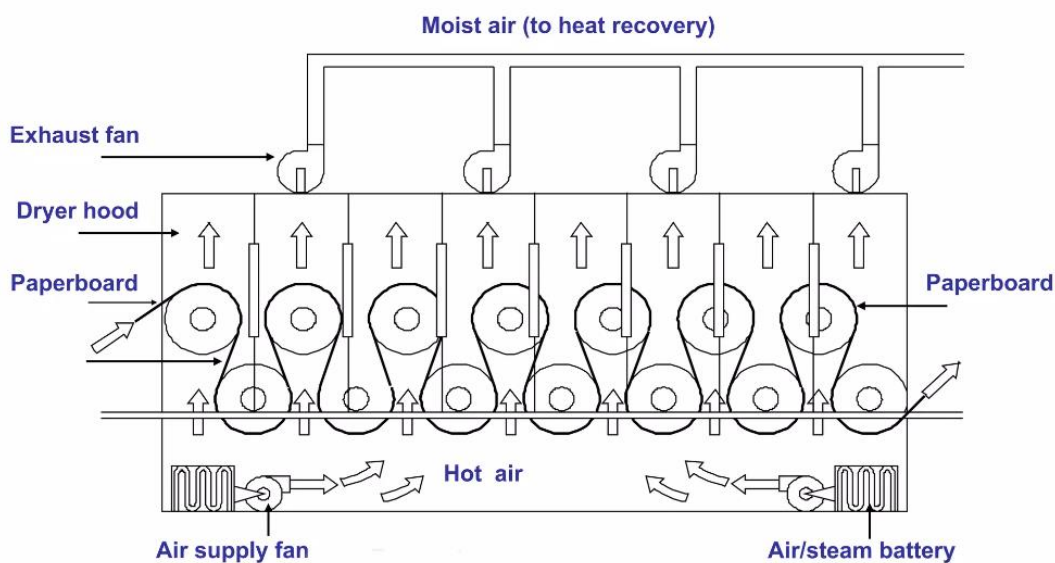
Obr. 27. Lisovací část papírenského stroje

Lisovací část se dá rozdělit na 5 hlavních dílčích komponentů. Jsou jimi nosná konstrukce, lisové válce, převáděcí válce, vodící válce a plstěnc. [27], [26], [28]

- Nosná konstrukce tvoří rám lisové části, ve kterém jsou umístěny jednotlivé lisy. Konstrukce musí být dostatečně tuhá, aby zajistila oporu pro jednotlivé lisy v návaznosti na lineární tlak mezi válci. Dále musí umožnit snadnou výměnu komponentů.
- Lisové válce jsou základním prvkem každého lisu. Skládá se z dvojce válců, které vzájemným přitlakem vytváří kontaktní plochu pro lisování. Válce jsou konstruovány na požadovaný lisovací tlak a rychlost. Každý válec se skládá z ocelového jádra a je potažen pryžovým potahem. Podle konstrukčního provedení můžeme lisové válce rozdělit na válce klasické, sací lisové válce, válce s řízeným průhybem a speciální lisové válce.
- Převáděcí válce slouží k přenosu papírového pásu při zavádění mezi jednotlivými lisy. Tento typ se nazývá mokrý převáděcí válec. Další uplatnění bývá na konci lisové části, kdy je prostřednictvím tohoto zařízení převeden vylisovaný pás do sušící části. Zde se používá konstrukce tzv. suchého převáděcího válce.
- Vodící válce se používají jako opora pro vedení plstěnce a papíru. Konstrukční provedení válců pro vedení plstěnce je obdobné jako u klasických lisových válců. Vodící válce papíru jsou instalovány v místech, kde dochází k tzv. volnému tahu papíru. Papír v této pozici není veden plstěncem, ale je v přímém kontaktu s povrchem válců.
- Plstěnc je sukno zhotovené předením, tkaním a zplošťováním. Jako materiál se dnes používají polyamidová vlákna nebo polyesterová vlákna. Používá se jako opora papírenského lisu v průchodu částmi papírenského stroje. Má zásadní vliv na odvodňovací procesy během lisování. Vlivem neustálého natahování a třením mezi válci je plstěnc značně opotřebováván a jeho životnost se pohybuje mezi 2 až 6 měsíci. Jakmile se plstěnc opotřebuje, musí se vyměnit za nový.

2.2.4. Sušící část

Sušící část papírenského stroje se skládá z otáčejících se dutých válců zevnitř vytápěných parou, které jsou umístěny zpravidla ve dvou řadách nad sebou. Válce jsou umístěny v ložiskách na rámu sušící části. Počet válců se řídí podle druhu vyráběného papíru, jeho plošné váhy a rychlosti válce tak, aby na konci sušící sekce měl list papíru vlhkost 5 až 7 %. Válců může být kolem 60, v některých případech až 100. List papíru je veden po povrchu otápěných válců pomocí sušícího plstěnce tak, aby se co nejlépe využilo sušící plochy válců. Sušící plstěnc je navržen tak, aby co nejlépe zlepšoval přestup tepla mezi válci a listem papíru. Plstěnc také brání vzniku vrásek v papíru při jeho smršťování vlivem procesu sušení. Průchod listu papíru sušící částí netrvá dlouho, u tenkých a středních papírů se



Obr. 28. Sušící část papírenského stroje

bavíme o době 20 až 40 sekund. Při sušení papíru mluvíme, podle místa a způsobu sušení na papírenském stroji, o sušení konvekčním a kontaktním. Konvekční proces spočívá v tom, že list papíru nepřijde do přímého kontaktu se sušícími válci. Teplo přijímá list papíru od okolního vzduchu až ke kritickému bodu, kdy dochází k odpařování vody z listu papíru za přibližně stálé teploty. Rychlost konvekčního sušení je podle teorie cca třikrát menší než u sušení kontaktního. Kontaktní sušení, jak už napovídá název, spočívá v předávání tepla na list papíru přímým kontaktem s otápěnými sušícími válci. Během průchodu listu papíru sušící částí se tyto dva způsoby sušení neustále střídají podle vhodného uspořádání válců. Celý tento celek je schovaný pod zákrytem. Úkolem zákrytu je snížit tepelné ztráty únikem tepla ze sušící části do haly papírenského stroje a zabránit úniku vlhkého vzduchu do haly papírenského stroje. [28], [26], [27]

2.2.4.1. Faktory ovlivňující sušení.

Mezi základní faktory ovlivňující sušicí proces patří teplota topné páry, povrchová teplota sušících válců, rychlost papírenského stroje, vlastnosti okolního vzduchu, systém ventilace a koeficient prostupu tepla mezi válcem a listem papíru. Koeficient prostupu tepla závisí na čistotě vnějších i vnitřních stěn sušícího válce, přítomnost vzduchu a kondenzátu uvnitř válce, na namáhání sušících plstěnců v tahu a jejich čistotě, na počáteční a konečné vlhkosti papíru atd. Dále mezi faktory ovlivňující sušení patří koeficient, který je ovlivněn typem vyráběného papíru. Jako poslední velký ovlivňující faktor je konstrukční provedení stroje.

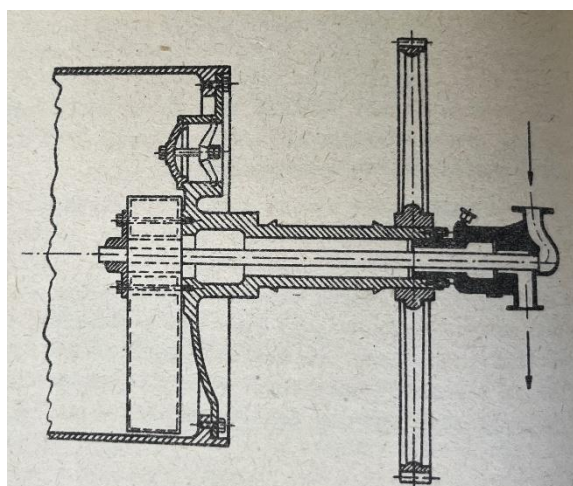
Vlivy konstrukce papírenského stroje na postup sušení lze shrnout do několika bodů.

- Průměr sušícího válce. Na průměru a počtu válců závisí počet „volných úseků“ mezi válci. Čím je „volných úseků“ více, tím lépe sušení probíhá, neboť dochází k rovnoměrnějšímu sušení. Pokud by docházelo k delšímu styku válce s jednou stranou papíru, strana by se přesušila, ale druhá strana by byla vlhčí. Při větším průměru válce roste tloušťka stěny a s ní vzrůstá odpor proti převodu tepla. Dále také stoupá ztráta na čelních plochách válců.
- Rychlost papírenského stroje. Při zvyšující se rychlosti papírenského stroje roste podíl vlhkosti odpařené na úsecích „volného tahu“ mezi sušícími válci.
- Délka „volného tahu“ má na průběh sušení značný vliv. Například při zvětšení z 0,65 a 2,6 m se kapacita sušení zvětší až o 6 %.
- Ventilace je důležitá pro správné fungování sušícího procesu. Aby se mohla voda správně odpařovat, je potřeba v sušící sekci udržovat předepsanou relativní vlhkost vzduchu. Z toho důvodu množství odváděného a přiváděného vzduchu přímo ovlivňuje účinnost sušení. Vlhký vzduch je odváděn (například pomocí rekuperačních věží) ven, mimo halu, a při cestě predehřívá nasávaný technický vzduch. Tímto způsobem docílíme úspory energie.

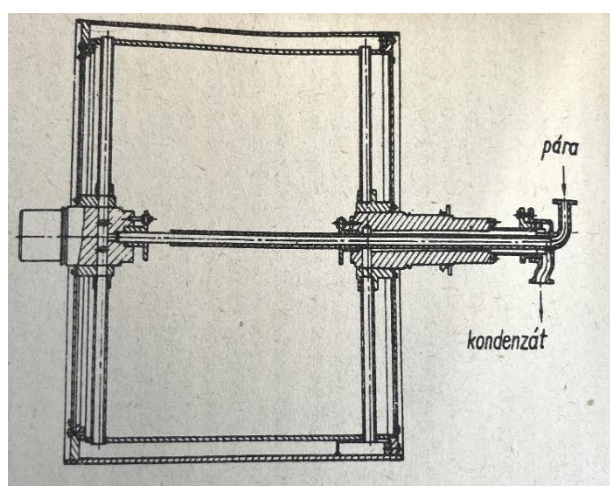
[28], [26], [27]

2.2.4.2. Konstrukce sušících válců

Sušící válce se původně vyráběly z tlustého měděného plechu, který přispíval k lepšímu prostupu tepla. Později se přecházelo na válce z lité oceli nebo z litiny, které se mohly potahovat měděným povlakem. Dnes můžeme vidět také válce svařované z ocelových plechů, které jsou čistě obrobené a vyleštěné do hladka. Pro výrobu některých speciálních typů papíru, jako je třeba fotografický papír, se válce chromují. Dále můžeme vidět také sušící válce s dvojitým pláštěm. Tato konstrukce zmenšuje tepelné ztráty na čelech válce. Typy a konstrukce válců se odvíjejí podle druhu vyráběných papírů. Pro každý druh papíru se hodí jiný sušící válec.



Obr. 30. Jednoplášťový sušící válec v řezu



Obr. 29. Dvoupplášťový sušící válec v řezu

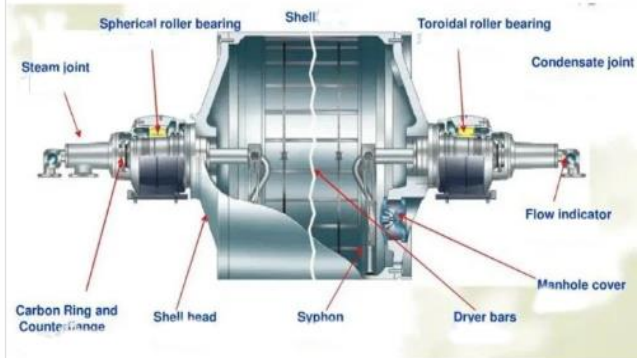
Každý sušící válec se skládá z pláště a čel s dutými čepy. Čela jsou přišroubována k plášti. Většinou jedním dutým čepem vstupuje pára do válce a druhým je odváděn kondenzát (duplex systém). Uvnitř válce jsou umístěny naběráky kondenzátu, které napomáhají k jejímu odvodu z válce. Válce jsou z důvodu čištění nebo oprav také opatřeny průlezem pro obsluhu, který se nachází v čele sušícího válce. Válce jsou konstruovány až na přetlak 10 baru. Tloušťka stěny litinových válců nebývá menší než 20 mm a průměr sušícího válce nepřesahuje, až na výjimky, 1500 mm. Délka válce se dimenzuje tak, aby byla o 100 až 150 mm větší než je maximální šířka vyráběného papíru. Nejproblematictější místem sušícího válce je přechod přívodu páry a odvodu kondenzátu z potrubí, které je nepohyblivě upevněno do dutého čepu otáčejícího se válce. Problematické je jak konstrukční uspořádání, tak způsob utěsnění.

Dvoupplášťový sušící válec (obr. 28) umožňuje používání vyšších přetlaků páry (5-10 baru) a urychluje cirkulaci páry, což brání nadměrné tvorbě kondenzátu a zlepšuje účinnost sušení. Oproti jednoplášťovým litinovým válcům je ztráta tepla ochlazováním čel u dvoupplášťových válců minimální. Vnitřní plášť sušícího válce je umístěn v malé vzdálenosti od vnějšího a do vzniklé mezery se přivádí vysokotlaká pára. Vzniklý kondenzát se odvádí dvojitým

otáčejícím se sifonem. Jeden čep slouží jak k přívodu páry, tak k odvodu kondenzátu (simplex systém). Také parní hlava je řešena pro přívod páry a odvod kondenzátu.



Obr. 31. Litinový sušící válec v ochranném dřevěném krytu



Obr. 32. Model sušícího válce

Mezi nové technologie sušících válců patří sušička typu „Yankee“ (obr. 33). Soustava sušících válců je zde nahrazena jedním válcem – Yankee válec. Šířka stroje je omezena šířkou tohoto válce. Průměr válce bývá až 5 m, pracovní šířka pak do 6 m. Sušící válec se používá při výrobě tenkých papírů o plošné hmotnosti 40 gm^{-2} a hygienických papírů. Výhodou je její nízká náročnost na energii a s tím spojená produkce emisí uhlíku. [28], [26], [27], [29], [30]



Obr. 33. Sušící válec typu Yankee

2.2.4.3. Topná zařízení papírenského stroje.

Jak už bylo řečeno, v sušící sekci se papír dosouší pomocí válců otápených parou. Pára má tu výhodu, že dokáže přenést velké množství tepla v podobě kondenzačního tepla a pomocí řízení tlaku páry dokážeme přesně řídit i teplotu válců, což je velice důležité pro správné sušení listu papíru. Závislost tlaku a teploty páry můžeme pozorovat v tabulce 1 (tj. tabulka syté páry). O výrobu páry se ve fabrice stará parní kotel. Jako palivo se dá použít od fosilních zdrojů po biomasu. V dnešní době se také využívá tzv. regenerační kotel, kde se z černého louhu stává znovu bílý louh a je znovu použit při výrobě buničiny. Pára z parního kotle je pak přiváděna potrubím k papírenskému stroji.

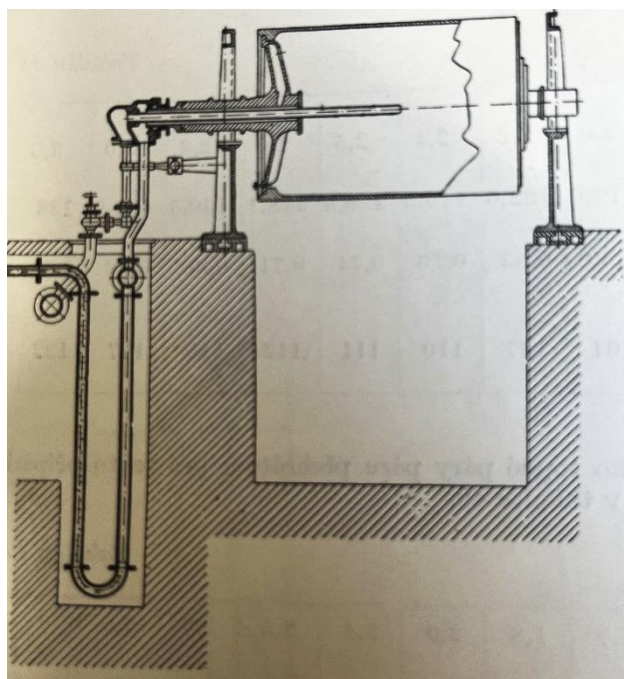
Pro správné fungování sušících válců je zapotřebí mít odvzdušněné potrubí, rychlý a účinný odvod kondenzátu ze sušících válců a možnost přesného řízení teploty na sušících válcích. Zapojení sušících válců na páru můžeme rozdělit na normální, sériové a okružní. [28], [26], [27]

Tlak syté páry v ata	1,5	1,7	2,0	2,2	2,4	2,5	2,6	2,8	3,0	3,5
Teplota páry v °C	111,0	114,5	119,6	122,6	125,5	126,8	128,1	130,5	132,9	138
Měrný objem syté páry v m ³ /kg	1,175	1,05	0,90	0,83	0,76	0,74	0,71	0,66	0,62	0,55
Teplota povrchu sušícího válce °C	95	98	104	107	110	111	112	115	117	122

Tabulka 1. Závislost tlaku páry na teplotě válce

Normální zapojení válců

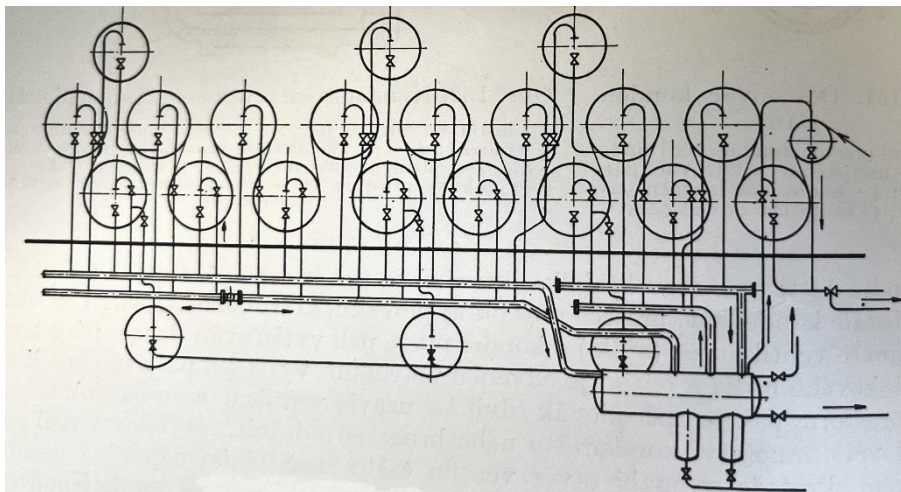
Toto zapojení je uspořádáno tak, že podél sušící části je vedeno hlavní parní potrubí. Parní potrubí bývá zpravidla uloženo v přístupném kanálu tak, aby byl dobrý přístup ze strany obsluhy. Tímto parním potrubím je přiváděna pára do sušících i vysoušecích válců. Vysoušecí válce vysoušejí plstěnce. Pára se přivádí z jedné strany a z druhé strany se odvádí kondenzát pomocí vhodných odlučovačů kondenzátu (separátorů). Ze strany obsluhy je umístěn ventil k okamžitému zastavení páry. Z důvodu seřizování přívodu páry k jednotlivým válcům má každé přiváděcí potrubí zvláštní ventil. Tlak páry se kontroluje Manometry, které jsou instalovány na přívodním potrubí. Tento způsob zapojení je jeden z těch nejzákladnějších a nejjednodušších způsobů. Zapojení tohoto typu dnes už spíše neuvídíme. [28], [26], [27]



Obr. 34. Zapojení sušícího válce

Sériové zapojení válců (kaskáda)

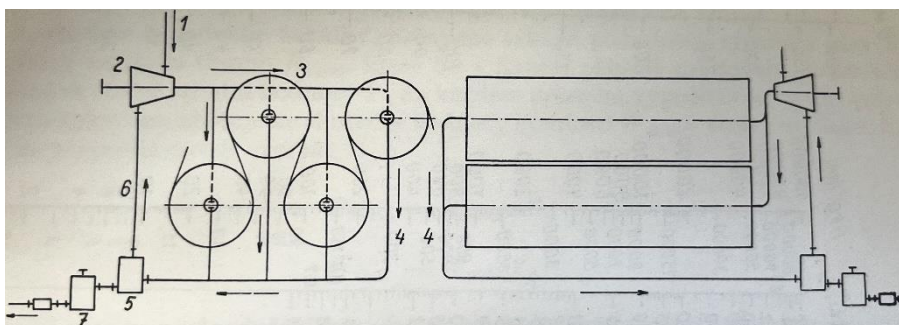
Zapojení tohoto typu se vyznačuje rozdělením do několika skupin. Jednotlivé skupiny pracují s odstupňovaným tlakem páry, který se řídí stupněm odpaření (požadovanou teplotní křivkou). Počet skupin je odvozen od celkové velikosti sušící části. Pára se přivádí jen od konce sušící části. Část přivedené páry jde přímo do sušících válců 1. skupiny, profuková pára jde přes odlučovač kondenzátu (separátor) do 2. skupiny sušících válců. Do sběrné jímky kondenzátu je kondenzát přiváděn ze všech sušících a předsušecích válců. Jelikož na prvním sušícím válci se odpařuje nejméně vody, je tento válec, stejně jako celá 3. skupina, spojen přímo se separátorem, z něhož se přivádí topná pára. Kondenzát nashromážděný v separátoru se vrací do kotelny a využívá se k napájení parních kotlů. Jiný způsob sériového zapojení se používá např. při výrobě novinového papíru, kdy je každá sekce na jiném tlaku páry, a tak i na jiné teplotě sušícího válce. Skupiny jsou odstupňovány obvykle tak, že nejmenší teplota je na začátku a nejvyšší na konci. [28], [26], [27]



Obr. 35. Sériové zapojení sušící části

Okružní systém zapojení

Okružní systém zapojení spočívá v tom, že přiváděná pára do válce částečně ztrácí svou energii natolik, že dochází ke kondenzaci. Směs kondenzátu a páry vychází z válce a jde do separátoru, kde je odloučena pára a kondenzát. Pára se zpátky vrací do oběhu k dalšímu využití (s použitím termokompresoru) a kondenzát se odvádí do kondenzační nádoby. [28]

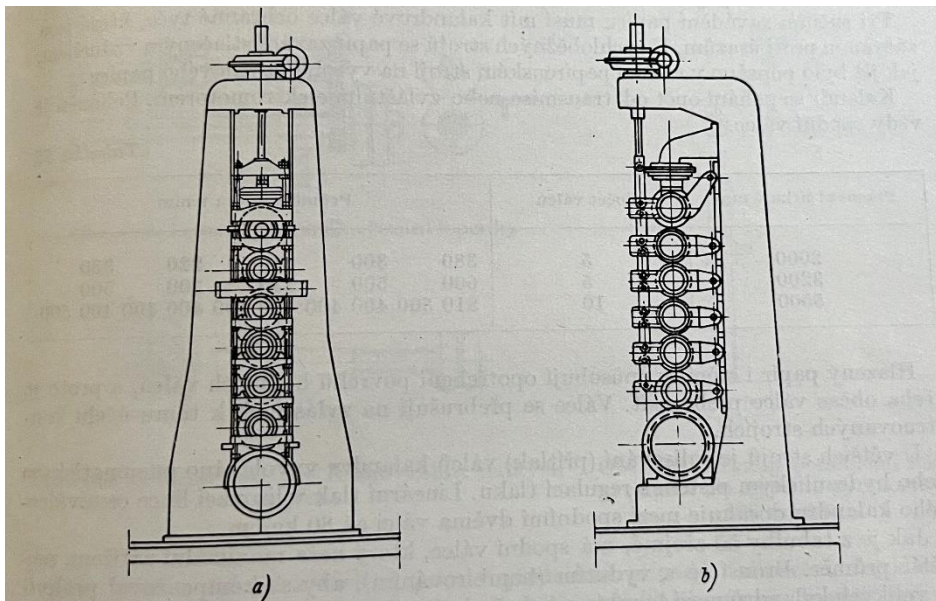


Obr. 36. Okružní systém zapojení

2.2.5. Chlazení a hlazení

Za sušící částí se nachází hladící stolice nebo také kalandr. Kalandr se používá pro výrobu hladkých papíru. Hladící funkci v papírenském stroji plní z části už mokré lisy v lisovací části a sušící válce v suché části. Konečnou hladkost list papíru získává až na konci stroje na kalandru. Pokud je vyžadována perfektní lesklost papíru, je papír před vstupem do kalandru zvlhčován. Zvlhčení probíhá pomocí vodní mlhy, která skrání list papíru.

Před vstupem listu papíru do kalandru musí být list zchlazen na cca 25 °C, k tomu většinou slouží poslední válce sušící části, které mají vlastní elektrický pohon. Kalandr se skládá z 5 až 10 válců vyrobených z tvrzené litiny. Válce jsou uspořádány kolmo nad sebou tak, že jejich osy leží na jedné přímce. Počet válců se řídí druhem papírenského stroje. Spodní válec kalandru je pevně upevněn v ložiscích, zatímco všechny horní válce jsou stavitelné. Papír se zavádí nejdříve mezi horní válce kalandru a z něj postupně na další válce kalandru. Největší tlak na list papíru je vyvíjen mezi posledním největším válcem a prvním válcem nad ním. U většiny strojů je zalisování (přítlak) válců kalandru hydraulické. Některé válce kalandru mohou být duté, aby se mohly buď vytápět parou nebo chladit vodou. [28], [26], [27]



Obr. 37. Schéma konstrukce sedmiválcového kalandru, a) uzavřený b) otevřený

2.2.6. Navíjecí zařízení

Každý papírenský stroj je vždy zakončen navíjecím zařízením, kde dochází k navíjení papírového pásu na dřevěné nebo kovové dutinky či kovové válce, známé jako tambory nebo navijáky (hašple). Navíjecí zařízení musí umožnit navíjet papír takovou rychlostí, jakou papírový list přichází z papírenského stroje a takovým tahem, jaký vyráběný papír snese.

Navíječ se skládá z velkého bubnu o průměru cca 1250 mm, jehož povrch je přesně obroušen. Na bubnu leží dva válce menšího průměru, přičemž na jeden válec se navíjí papír a druhý je vždy válcem náhradním. Papír se navádí na tambor proudem stlačeného vzduchu. Navinovaný kotouč papíru se přitlačuje k nosnému bubnu pneumatickým pístovým zařízením, kterým lze regulovat tvrdost navinutí. Moderní navíječe umožňují po navinutí jednoho tamboru velice rychle navinutý tambor odsunout a na stroj přisunout další. [28], [26], [27]

2.2.7. Závěrečné práce

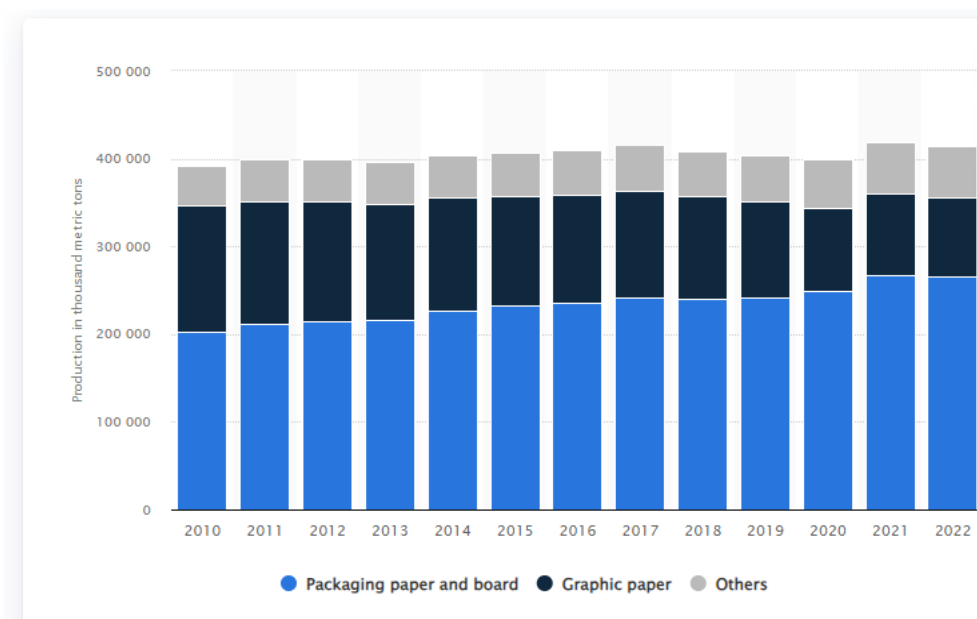
Řezání papíru. Někdy je potřeba papír řezat přímo na papírenském stroji. K tomuto účelu slouží takzvané podélné řezačky, které se nacházejí ještě před kalandrem. Většinou však řezání papíru nastává až na navitém válci papíru. Tím se role papíru formujeme do námi požadovaných rozměrů. [28], [26], [27]

Balení papíru je konečnou fází výroby papíru, kde je výsledný produkt zabalen a připraven na export k zákazníkům.

2.3. Energetická náročnost výroby papíru

2.3.1. Úvod

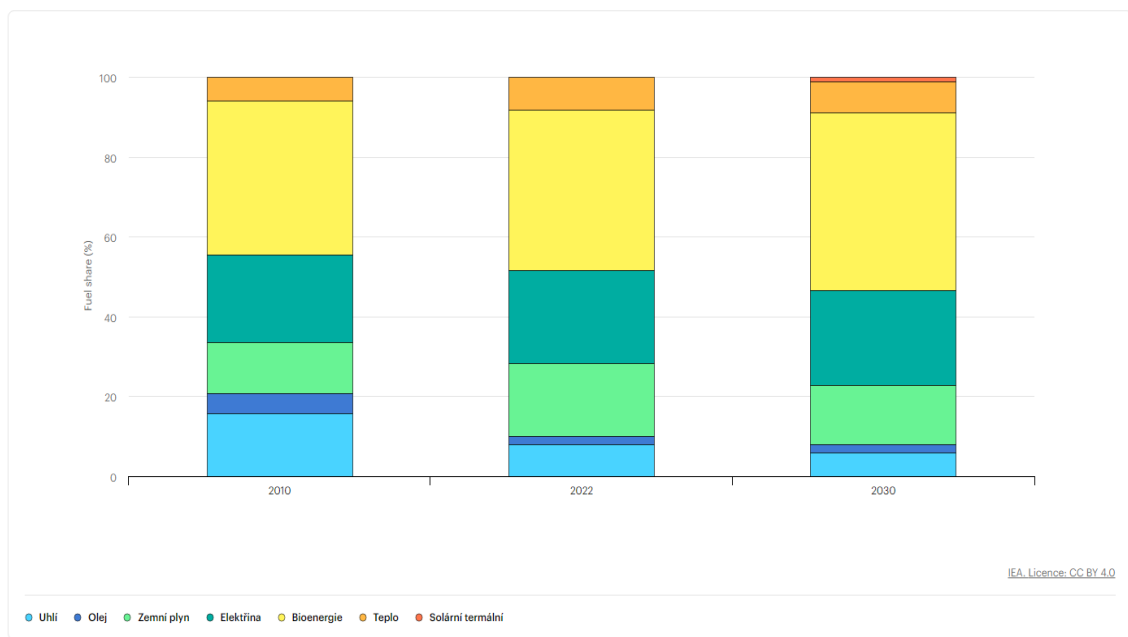
Papírenský průmysl je jedním z důležitých a velmi rozvinutých průmyslů. Celkové množství vyrobeného papíru v roce 2022 dosáhlo 414 milionů tun. Na obrázku 38 můžeme vidět vývoj produkce papíru za 12 let. Jen v Evropě se vyrobí cca 85 milionů tun s celkovým obrátem 180 miliard eur ročně. S čím dál větším důrazem na udržitelnost se předpokládá ještě větší nárůst poptávky po papíru. Papír má tu výhodu, na rozdíl od plastu, že je dobře rozložitelný v přírodě, lze ho dostatečně dobře recyklovat a současné technologie nemají problém s jeho jednoduchou likvidací. Na druhou stranu energetická náročnost výroby papíru není malá. Papírenský průmysl je jedním z energeticky nejnáročnějších odvětví. Podle statistiky z roku 2021 byla celková spotřeba energie 1361 petajoulů energie, což je v přepočtu 378 TWh energie. Kdybychom to vztáhli pouze na elektrickou energii, tak jaderná elektrárna Temelín za dobu svého provozu (22 let) vyrobila 300 TWh elektrické energie. Odvětví celulózy a papíru bylo v roce 2022 zodpovědné za necelá 2 % všech emisí z průmyslu. [31], [32]



Obr. 38. Přehled celkové výroby papíru za rok (během 12 let) [31]

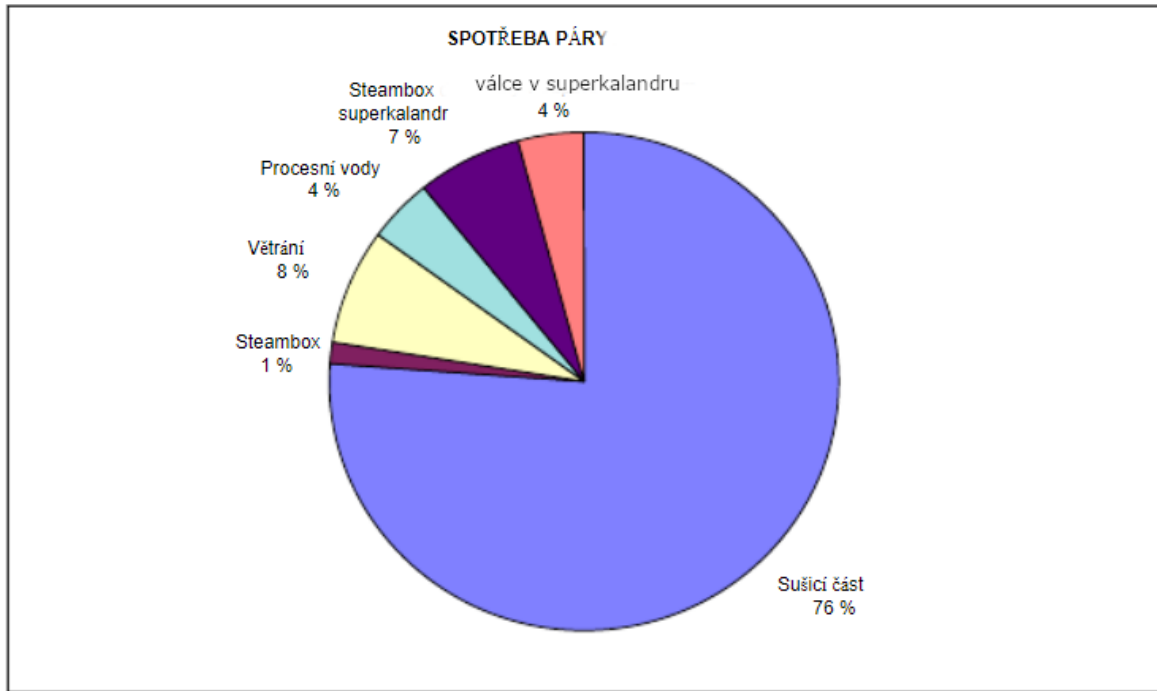
2.3.2. Spotřeba energie

Jak už bylo řečeno, výroba papíru je velice energeticky náročná a její podíl na celosvětové spotřebě energie, a s tím spojená zátěž na životní prostředí, není zanedbatelná. V současnosti je snaha snižovat potřebnou energii pro výrobu, ale také zvyšovat podíl obnovitelných zdrojů na výrobu energie potřebnou pro výrobu papíru. Rozložení zdrojů energie a její predikce můžeme vidět na obrázku 39. V minulosti bylo hojně používáno uhlí a topné oleje na výrobu páry a teplé vody. Tato paliva jsou v současnosti nahrazována buď regeneračními kotli, kotli na biomasu, tepelnými čerpadly, anebo jejich kombinací.

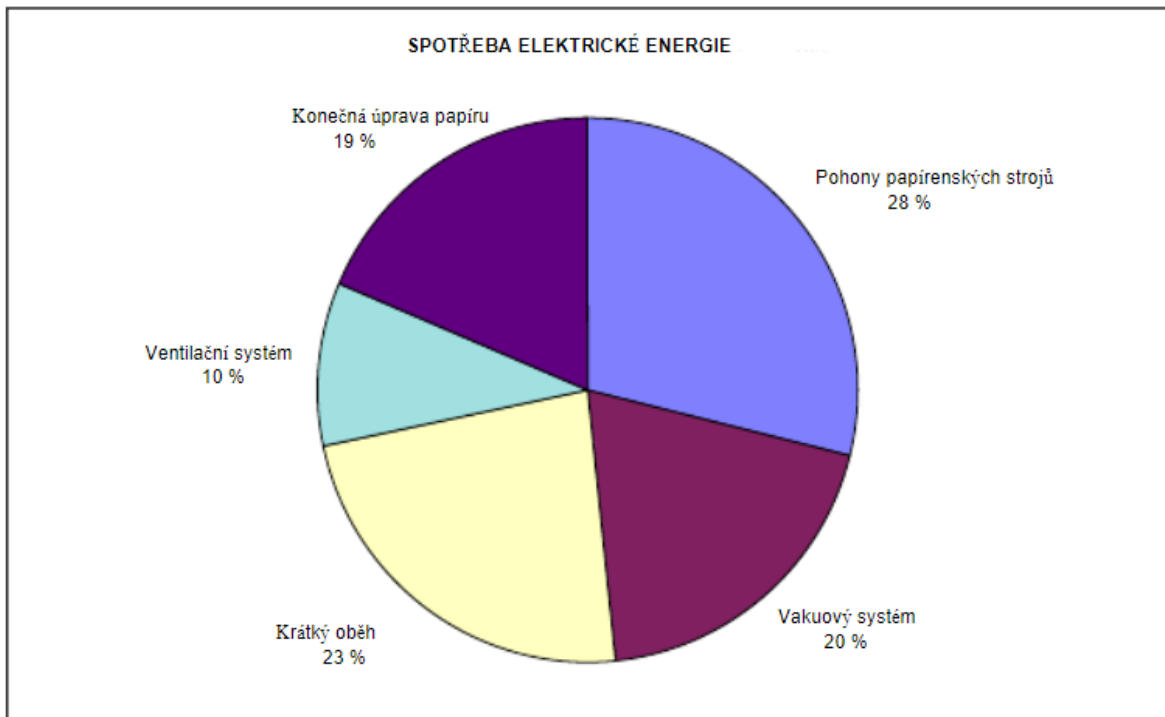


Obr. 39. Rozložení zdrojů energie [34]

Průměrné hodnoty spotřeby tepelné a elektrické energie se pohybují v rozmezí 5 až 7 GJ/t a 600 až 1000 kWh/t papíru. Tepelná energie představuje 2/3 spotřeby energie, ovšem dnes se stále velký podíl elektrické energie vyrábí z fosilních paliv. Spotřeba se různí podle typu stroje a typu vyráběného papíru. Většina vyrobené páry se spotřebuje v sušící sekci. Pára se také používá k ohřevu přiváděného vzduchu do sušící sekce, k ohřevu sprchové vody v lisovací sekci, k výrobě teplé vody a zvyšování teploty pásu v superkalandrech. Rozložení spotřeby páry je znázorněno na obrázku 41. Největší část elektrické energie je potřebná k otáčení válců. Spotřeba spočívá v překonání tření způsobeného vlečením součástí, překonání deformační práce v lisovací části a v udržení přiměřeného napětí pásů. Potřeba způsobená třením pokrývá asi 97 % celkové spotřeby električiny v pohonu. Další velká část elektrické energie se spotřebovává k výrobě vakua potřebného v nátoku nebo vakuových válci. Dalším žroutem elektrické energie jsou čerpadla. Nemalou část ve spotřebě hrají i ventilátory potřebné k větrání. Zbylá část elektrické energie se dále spotřebovává v dílčích strojích na konečnou úpravu papíru. Celkové procentuální rozložení spotřebované elektrické energie můžeme vidět na obrázku 40. [33], [34], [31]



Obr. 41. Rozložení spotřeby páry v papírenském stroji [33]



Obr. 40. Rozložení spotřeby tepelné energie v papírenském stroji [33]

2.3.3. Možnosti úspor

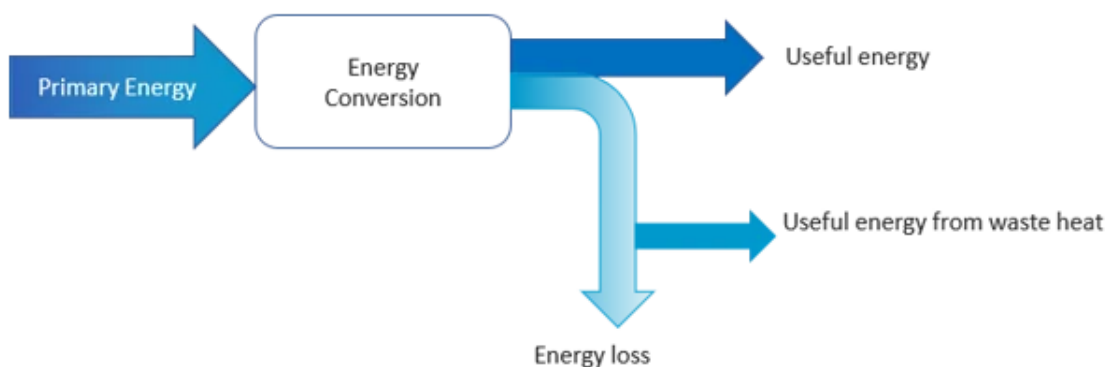
Jak už bylo řečeno v kapitole 2.3.2, papírenský průmysl je náročný na spotřebu jak elektrické, tak tepelné energie. V obou případech je stále potenciál pro jejich úsporu.

Tepelná energie

Cca 2/3 celkové energie, potřebné k výrobě papíru, je tepelná energie. Možností, jak tuto spotřebu snížit, je několik.

První možnost je zvýšení účinnosti kotle (instalování ekonomizéru, používání odpadní páry pro předehřev napájecí vody, vyladění spalovacího procesu atd.). Další možností, jak ušetřit tepelnou energii, je dostatečná izolace potrubních sítí a zamezení úniků páry ze systému. [35], [36], [37]

Jednou z hodně probíraných možností, jak uspořit tepelnou energii, je využívání odpadního tepla z výrobního procesu. Z důvodu nutné ventilace vlhkého vzduchu v sušící sekci přicházíme o velké množství tepla. Toto teplo lze rekuperovat do ohřevu přiváděného vzduchu nebo předehříváním vzduchu v meziprostoru střechy a v zákrytu stroje, kde se musí držet minimální teplota vzduchu, aby nedocházelo ke kondenzaci vody. Další odpadní teplo, které lze využít, je ve formě odpadní brýdové páry v sušící sekci. Teplo této páry zase lze využít buď k předehřevu vzduchu v sušící sekci, nebo by se dalo využít na sezónní vytápění či k předehřevu vody do kotle. Dalším velkým zdrojem odpadního tepla je výroba buničiny. Jedním z trendů dnešní doby je přenést nízkopotenciální odpadní teplo na vyšší úroveň pomocí tepelných čerpadel a znovu ho použít k výrobě průmyslové páry. [35], [36], [37]



Obr. 42. Blokový diagram využití energie [37]

Elektrická energie

Cca 1/3 celkové energie potřebné k výrobě papíru je elektrická energie.

Velký potenciál, kde lze snižovat spotřebu elektrické energie, je stlačený vzduch. Pro výrobu stlačeného vzduchu je potřeba velké množství energie, a přesto je tento fakt často přehlížen. V závodech můžeme často narazit na úniky v potrubní síti, stlačování vzduchu na větší úroveň, než je potřeba nebo špatnou údržbu strojů na stlačený vzduch. Odstraněním těchto problémů můžeme dosáhnout úspory energie, vynaložené na stlačování vzduchu, až o 50 %. [35], [36], [31]

Dalším velkým spotřebitelem elektrické energie v papírně jsou čerpadla, ventilátory a elektrické motory. Čerpadla jsou velmi choulostivá zařízení. Špatným dimenzováním čerpadla do systému lze výrazně zvýšit jeho spotřebu elektrické energie, než by byla potřeba, a lze i zásadně snížit jeho životnost. Čerpadla spotřebují velké množství elektrické energie a patří k dražším strojům. Správným dimenzováním a koupí kvalitního čerpadla s úsporným motorem lze docílit značné úspory elektrické energie. Elektrický pohon se v papírně používá na pohon čerpadel, ventilátorů, válců a prakticky všeho, co se otáčí. Koupí vysoce účinných elektromotorů s proměnnou rychlostí VSD lze docílit další značné úspory elektrické energie. Další hojně používanou komponentou v papírně jsou ventilátory. Koupí účinnějších ventilátorů lze docílit úspory elektrické energie. [35], [36], [31]

Možná úspora elektrické energie se skrývá i v osvětlení. Přechodem na LED osvětlení lze zase uspořit část elektrické energie. [35], [36], [31]

Primární energie

Jelikož je při výrobě papíru potřeba jak elektrická, tak tepelná energie, vyplatí se instalovat zdroje na kombinovanou výrobu elektřiny a tepla tzv. kogenerace. Tímto způsobem se dá využít až 95 % dodaného paliva.

Praktická část

3. Úvod

V Papírenském stroji PM 5 vzniká brýdová pára, kterou sušící kaskáda nedokáže využít a je mařená v kondenzátoru. Cílem této práce je zhodnotit možnost využití této páry pro částečný nebo úplný ohřev nasávaného technického vzduchu na požadovanou teplotu. Tento vzduch je nasáván z prostor strojovny a je ohříván na 105 °C. Poté je vháněn do zákrytu stroje a do mezistropu haly papírenského stroje. Využitím brýdové páry by se ušetřila ostrá 3barová pára, která je aktuálně používána pro požadovaný ohřev vzduchu. Dále by se také ušetřila voda potřebná ke kondenzaci brýdové páry. Součástí práce je celková energetická bilance a stanovení ročních úspor při možném využití brýdové páry. Výstupem práce je poté stanovení doby návratnosti investice a zhodnocení její proveditelnosti.

4. Analýza současného stavu

4.1. Lokace

Papírenský stroj PM5 se nachází v objektu papírny Mondi (obr. 43), která stojí na pravém břehu řeky Labe ve městě Štětí, okres Litoměřice, Ústecký kraj. Závod byl založen roku 1949 a od roku 2000 spadá pod akciovou společnost Mondi. Produkce papíru je cca 1700 tun papíru denně.

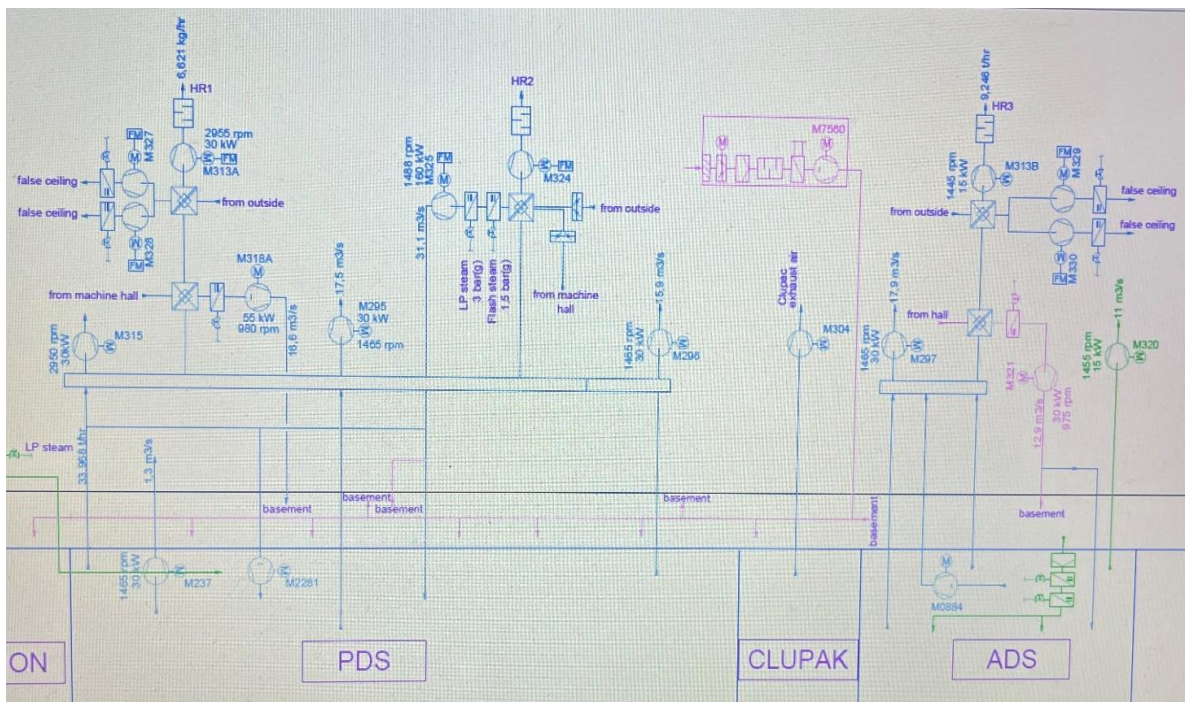


Obr. 43. Papírna Mondi Štětí a umístění PM 5 (letecký pohled)

4.2. Popis stroje

Papírenský stroj PM5 má rekuperační věže, které slouží k odvodu vlhkého vzduchu ze sušící sekce a k částečné rekuperaci tepla. Na věžích jsou instalovány výměníky tepla vzduch – vzduch. Ty slouží k rekuperaci tepla z odváděného vlhkého vzduchu do nasávaného technického vzduchu. Za ním je instalován výměník pára – vzduch, který slouží k ohřevu vzduchu na požadovaných 105 °C. Ohříváný vzduch je nasáván z prostoru haly a je vháněn do meziprostoru stropu a do zákrytu papírenského stroje. Do meziprostoru stropu je vháněn z důvodu zamezení kondenzace vodní páry. Do zákrytu papírenského stroje je vháněn pro zlepšení celkové tepelné bilance stroje.

Každá věž má jiné vstupní parametry a věž číslo 2 je po rekonstrukci, která proběhla v roce 2010. Celkový náhled na zapojení věží vidíme na obr. 44.



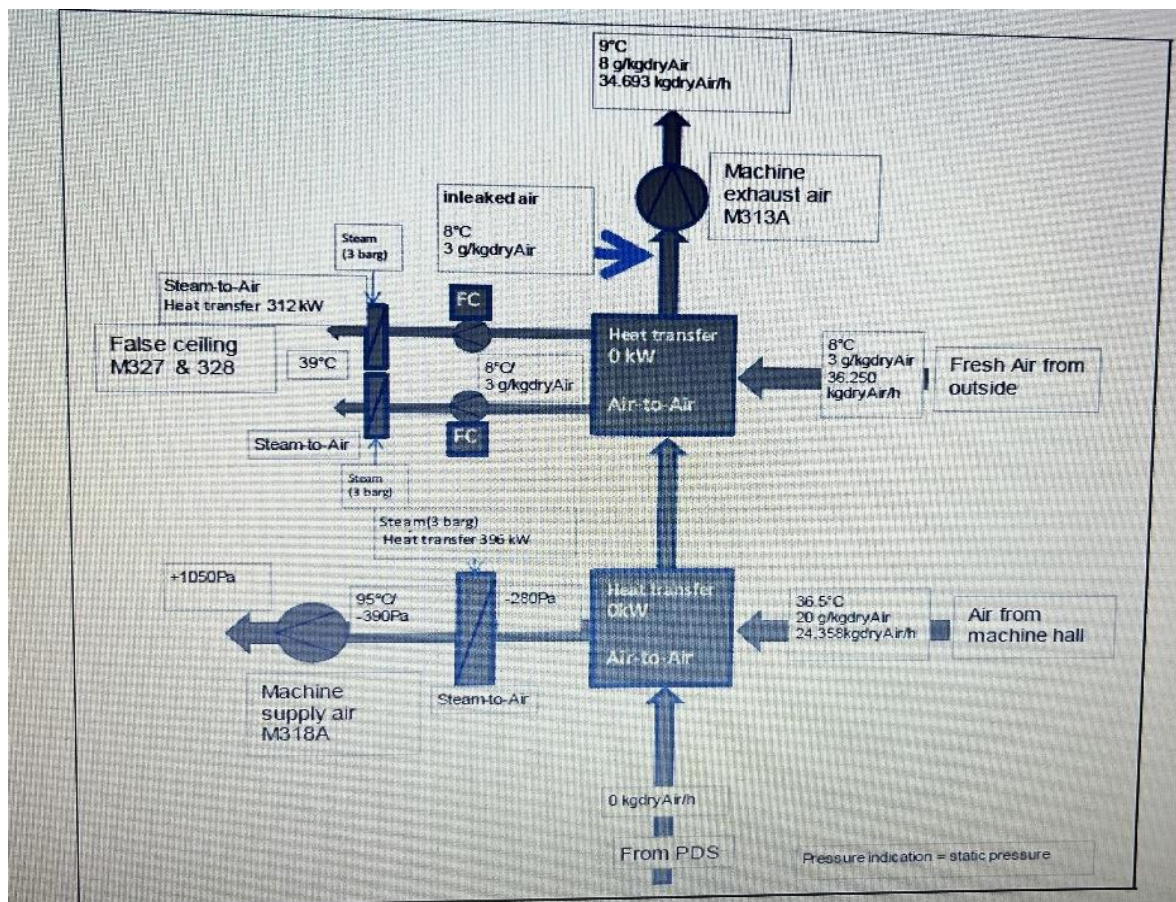
Obr. 44. Celkové schéma věží

4.3. Rekuperační věž č.1

4.3.1. Popis

Odtahovaný vzduch ze stroje prochází prvním výměníkem vzduch – vzduch, kde ohřívá nasávaný vzduch z haly. Nasávaný vzduch dále prochází výměníkem pára – vzduch. Do výměníku vstupuje ostrá 3barová pára jako ohřívající médium. Vzduch opouští výměník o požadované teplotě a vstupuje do zákrytu stroje. Odtahovaný vzduch ze stroje pokračuje do druhého výměníku vzduch – vzduch, kde ohřívá nasávaný vzduch z venku. Nasávaný vzduch dále pokračuje do dvou paralelně řazených stejných výměníků pára – vzduch. Do výměníku vstupuje ostrá 3barová pára jako ohřívající médium. Ohřátý vzduch vystupuje z výměníku a vstupuje do meziprostoru stropu. Vzduch ze stroje je dále vypouštěn do ovzduší.

4.3.2. Schéma rekuperační věže č. 1



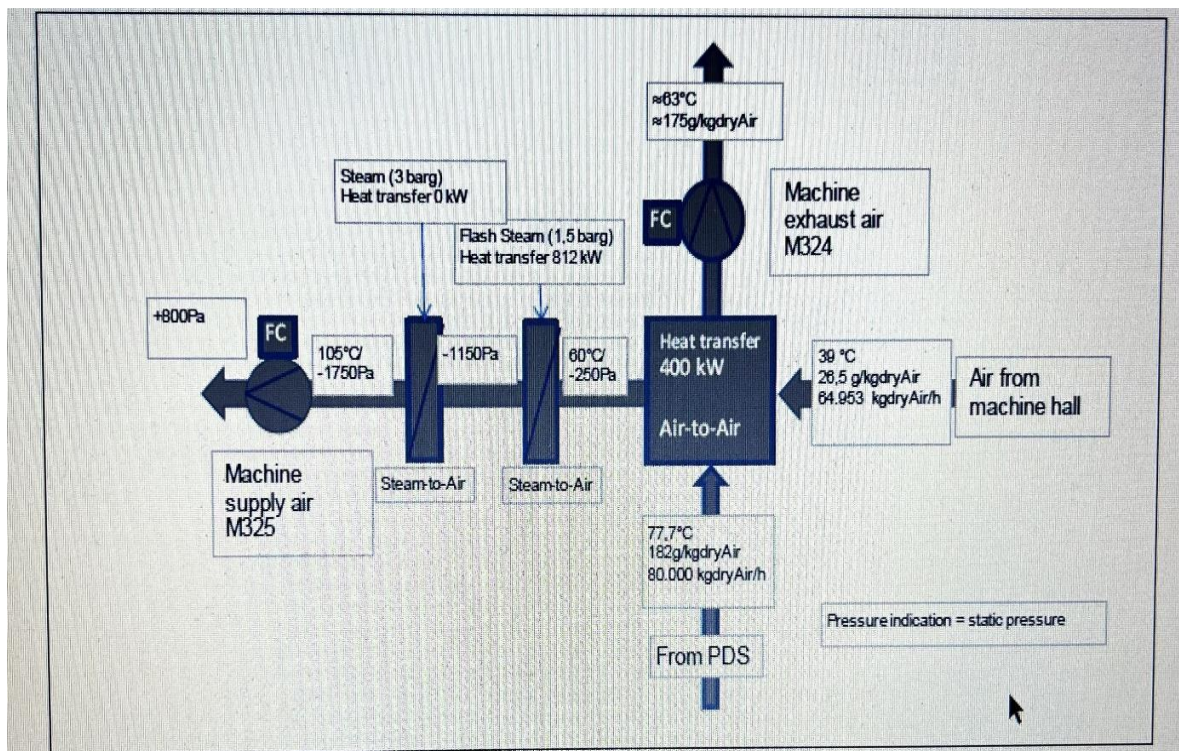
Obr. 45. Schéma věže č. 1

4.4. Rekuperační věž č.2

4.4.1. Popis

Věž č. 2 je po rekonstrukci z roku 2010, a tak se její uspořádání komponent liší. Vzduch ze stroje prochází výměníkem vzduch – vzduch, kde ohřívá nasávaný vzduch z haly. Nasávaný vzduch dále prochází prvním výměníkem pára – vzduch, do kterého vstupuje expandovaná 1,5bar pára jako ohřívající medium. Vzduch opouští výměník a vstupuje do druhého výměníku pára – vzduch. Zde je vzduch do ohříván na požadovanou teplotu pomocí ostré 3barové páry a vstupuje do zákrytu stroje. Odtahovaný vzduch ze stroje je dále vypouštěn do ovzduší.

4.4.2. Schéma rekuperační věže č. 2



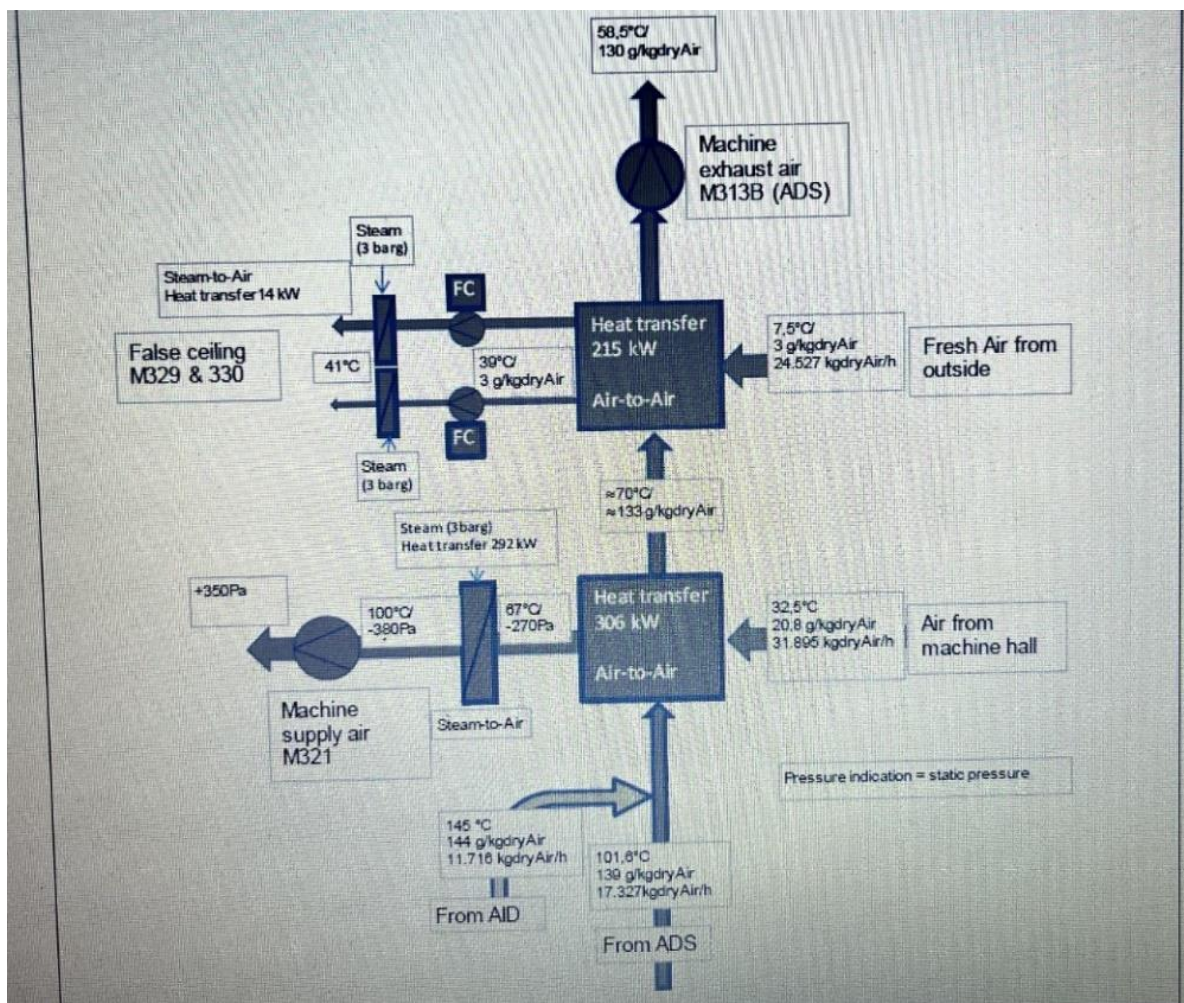
Obr. 46. Schéma věže č. 2

4.5. Rekuperační věž č.3

4.5.1. Popis

Odtahovaný vzduch ze stroje prochází prvním výměníkem vzduch – vzduch, kde ohřívá nasávaný vzduch z haly. Nasávaný vzduch dále prochází výměníkem pára – vzduch. Do výměníku vstupuje ostrá 3barová pára jako ohřívající médium. Vzduch opouští výměník o požadované teplotě a vstupuje do zákrytu stroje. Odtahovaný vzduch ze stroje pokračuje do druhého výměníku vzduch – vzduch, kde ohřívá nasávaný vzduch z venku. Nasávaný vzduch dále pokračuje do dvou paralelně řazených stejných výměníků pára – vzduch. Do výměníku vstupuje ostrá 3barová pára jako ohřívající médium. Ohřátý vzduch vystupuje z výměníku a vstupuje do meziprostoru stropu. Vzduch ze stroje je dále vypouštěn do ovzduší.

4.5.2. Schéma rekuperační věže č. 3



Obr. 47. Schéma věže č. 3

5. Technické řešení použití brýdové páry a energetická bilance rekuperačních věží

5.1. Technický popis upgradu rekuperačních věží

V sušící sekci papírenského stroje se nachází odpadní teplo ve formě brýdové páry. Koncept využití této páry spočívá ve využití tohoto tepla pro předehřev vzduchu. Technickým řešením tohoto konceptu by bylo přivedení brýdové páry do výměníku, který by byl instalován za rekuperační výměník ventilovaného vlhkého vzduchu. Vlhký vzduch by tedy odcházel z prostor stroje do rekuperačního výměníku, kde by své teplo částečně předal nasávanému přiváděnému vzduchu a pokračoval do výduchu na střeše. Přiváděný vzduch by dále pokračoval do výměníku, který by byl otápen zmíněnou brýdovou párou na požadovanou teplotu. Při nedostatečném množství brýdové páry potřebné pro předehřev vzduchu na požadovanou teplotu, by byl za tento výměník instalován i výměník otápený ostrou 3barovou parou, který by vzduch případně dohřál. Schéma zapojení je vidět na obrázku č. 48. Podobné zapojení můžeme vidět i u věže č. 2 (obr. 46).

5.1.1. Definice odpadního tepla ve formě brýdové páry

Brýdová pára má charakter jedno barové páry a je to odpadní pára, kterou sušící kaskáda nedokáže využít. Před vstupem do výměníku je nutno tuto páru odvodnit a mechanicky vysušit, takže do výměníku vstupuje čistá jedno barová pára.

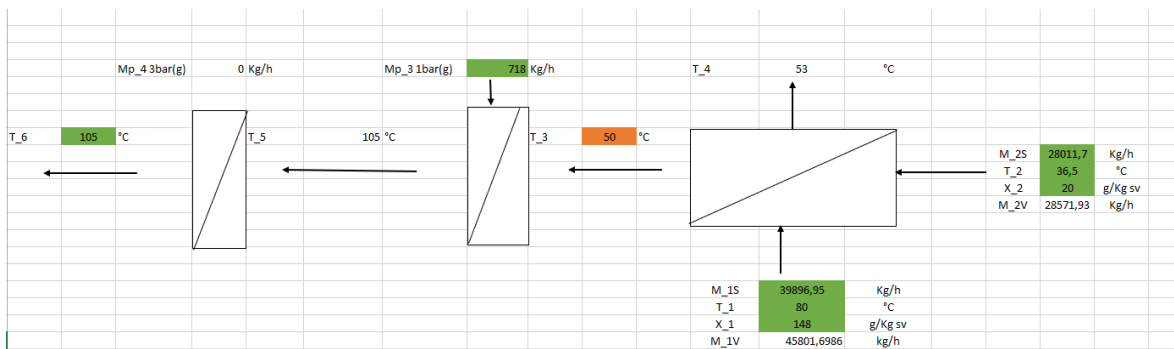
5.2. Předpoklady

Pro zjednodušení výpočtů zavádíme několik předpokladů. Zavedené předpoklady zásadně neovlivňují výsledky. Odchylka, které se tímto zjednodušením můžeme dopustit, je přijatelná pro odhad finančních úspor. Zmíněné předpoklady:

- A) Při výpočtech předaného tepla parou uvažujeme pouze kondenzační teplo a zanedbáváme teplo odevzdané dochlazováním kondenzátu.
- B) Předpokládaná účinnost rekuperačního výměníku je 50 %.
- C) Zanedbáváme tepelné ztráty výměníku na brýdovou a 3barovou páru a tepelné ztráty potrubí. Potrubí jsou tepelně izolované
- D) Vlivem proměnných parametrů stroje během roku nelze dopředu stanovit přesné množství dostupné brýdové páry v každý moment. Z tohoto důvodu při základním bilančním výpočtu počítáme s množstvím brýdové páry, které je potřebné pro požadovaný ohřev na 105 °C. Odhadované množství činí 1500-2000 kg/h. Tento proměnný parametr je dále zohledněn v ekonomickém hodnocení.

- E) Do budoucího provozu se počítá s navýšením kapacity stroje o 15 %. To zvýší hmotnostní průtok nasávaného strojního vzduchu a odváděného vlhkého vzduchu o 15 %. Veškeré výpočty počítají s tímto navýšením provozu.

5.3. Rekuperační věž č. 1



Obr. 48. Schéma věž č. 1 Excel

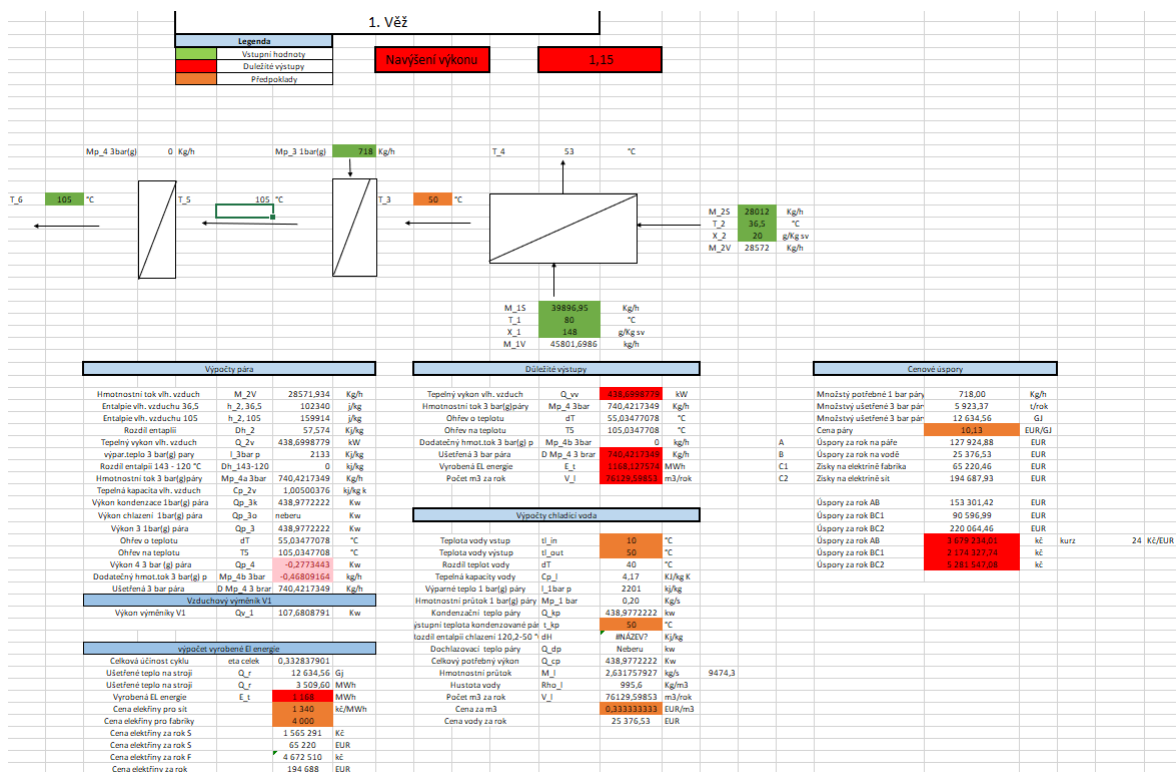
5.3.1. Vstupní hodnoty

Tabulka vstupních hodnot			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Hmotnostní tok vstupního strojního suchého vzduchu	M_1s	39896,95	kg/h
Vlhkost vstupního strojního vzduchu	x_1	148,00	g/kg s.v.
Teplota vstupního strojního vzduchu	t_1	80,00	°C
Výstupní teplota strojního vzduchu z rekup.	t_4	53,00	°C
Hmotnostní tok vstupního venkovního suchého vzduchu	M_2s	28011,70	kg/h
Vlhkost vstupního venkovního vzduchu	x_2	20,00	g/kg s.v.
Teplota vstupního vzduchu z haly nasávaný pod stropem	t_2	36,50	°C
Výstupní teplota strojního vzduchu z rekup.	t_3	50,00	°C
Koncová teplota venkovního vzduchu	t_6	105,00	°C
Vstupní teplota chladicí vody	tl_in	10	°C
Výstupní teplota chladicí vody	tl_out	50	°C

Tabulka 2. Vstupní hodnoty věž č. 1

5.3.2. Postup výpočtů

Pro výpočty byl vytvořen matematický model v MS Excel pro každou věž. Náhled podoby modelu viz obr. 49.



Obr. 49. Ukázka matematického modelu MS Excel

Hmotnostní tok vstupního vlhkého vzduchu.

$$M_{2v} = M_{2s} + \frac{X_2 \cdot M_{2s}}{1000} = 28571,93 \text{ kg/h}$$

Tepelná kapacita vstupního vlhkého vzduchu.

$$Cp_{2v} = 1,005 + 0,000188 \cdot \frac{X_2}{1000} = 1,005 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

Potřebný tepelný výkon pro ohřátí vstupního vzduchu na 105 °C.

$$Q_{2v} = \frac{M_{2v}}{3600} \cdot Cp_{2v} \cdot (t_2 - t_6) = 438,7 \text{ kW}$$

Potřebné množství (ušetřené) ostré 3barové páry.

$$Mp_{3bar} = \frac{Q_{2v}}{Lp_{3bar}} \cdot 3600 = 740,42 \text{ kg/h}$$

Potřebné (ušetřené) množství nevyužité brýdové páry.

$$Mp_{1bar} = \frac{Q_{2v}}{Lp_{1bar}} \cdot 3600 = 718 \text{ kg/h}$$

Potřebné (ušetřené) množství chladicí vody do kondenzátoru.

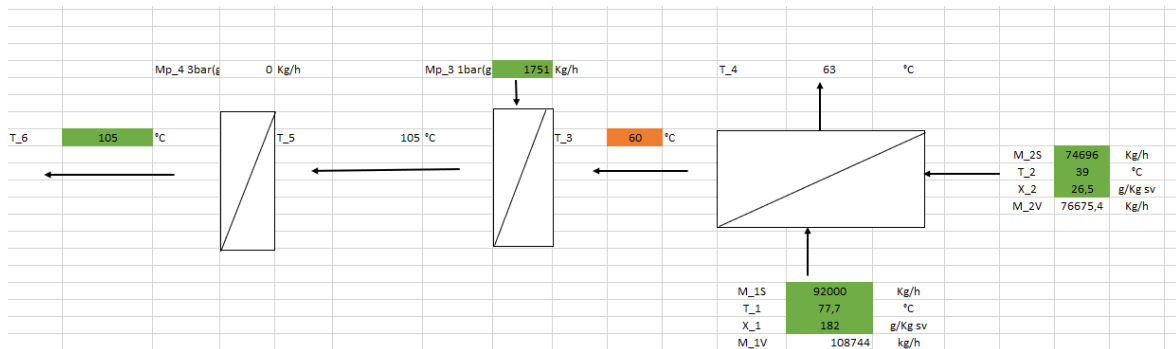
$$M_l = \frac{Q_{2v}}{Cp_l \cdot (tl_{in} - tl_{out})} \cdot 3600 = 9632,67 \text{ kg/h}$$

$$V_l = \frac{M_l \cdot 8000}{\rho_l} = 76129,6 \text{ m}^3/\text{rok}$$

Tabulka vypočtených hodnot			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Hmotnostní tok vstupního vlhkého vzduchu	M_2v	28571,93	kg/h
Potřebný tepelný výkon	Q_2v	438,70	kW
Ušetřené množství ostré 3bar. páry	Mp_3bar	740,42	kg/h
Potřebné množství brýdové páry	Mp_1bar	718,00	kg/h
Ušetřené množství chladicí vody	V_1	76129,60	m ³ /rok

Tabulka 3. Vypočtené hodnoty věž č. 1

5.4. Rekuperační věž č. 2



Obr. 50. Schéma věž č. 2 Excel

5.4.1. Vstupní hodnoty

Tabulka vstupních hodnot			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Hmotnostní tok vstupního strojního suchého vzduchu	M_1s	92 000,00	kg/h
Vlhkost vstupního strojního vzduchu	x_1	182,00	g/kg s.v.
Teplota vstupního strojního vzduchu	t_1	77,70	°C
Výstupní teplota strojního vzduchu z rekup.	t_4	63,00	°C
Hmotnostní tok vstupního venkovního suchého vzduchu	M_2s	74 695,95	kg/h
Vlhkost vstupního venkovního vzduchu	x_2	26,50	g/kg s.v.
Teplota vstupního vzduchu z haly nasávaný pod stropem	t_2	39,00	°C
Výstupní teplota strojního vzduchu z rekup.	t_3	60,00	°C
Koncová teplota venkovního vzduchu	t_6	105,00	°C
Vstupní teplota kondenzační vody	tl_in	10	°C
Výstupní teplota kondenzační vody	tl_out	50	°C

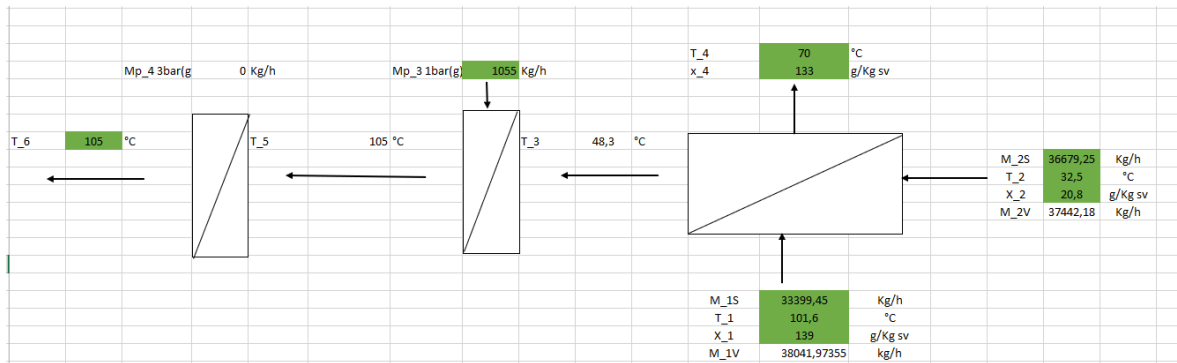
Tabulka 4. Vstupní hodnoty věž č. 2

5.4.2. Výpočty

Tabulka vypočtených hodnot			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Hmotnostní tok vstupního vlhkého vzduchu	M_2v	76 675,39	kg/h
Potřebný tepelný výkon	Q_2v	963,24	kW
Ušetřené množství ostré 3bar. páry	Mp_3bar	1 552,92	kg/h
Potřebné množství brýdové páry	Mp_1bar	1 751,00	kg/h
Ušetřené množství chladicí vody	V_1	185 658,67	m3/rok

Tabulka 5. Vypočtené hodnoty věž č. 2

5.5. Rekuperační věž č. 3



Obr. 51. Schéma věž č. 3 Excel

5.5.1. Vstupní hodnoty

Tabulka vstupních hodnot			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Hmotnostní tok vstupního strojního suchého vzduchu	M_1s	33 399,45	kg/h
Vlhkost vstupního strojního vzduchu	x_1	139,00	g/kg s.v.
Teplota vstupního strojního vzduchu	t_1	101,60	°C
Výstupní teplota strojního vzduchu z rekup.	t_4	133,00	°C
Hmotnostní tok vstupního venkovního suchého vzduchu	M_2s	36 679,25	kg/h
Vlhkost vstupního venkovního vzduchu	x_2	20,80	g/kg s.v.
Teplota vstupního vzduchu z haly nasávaný pod stropem	t_2	32,50	°C
Výstupní teplota strojního vzduchu z rekup.	t_3	48,30	°C
Koncová teplota venkovního vzduchu	t_6	105,00	°C
Vstupní teplota kondenzační vody	tl_in	10	°C
Výstupní teplota kondenzační vody	tl_out	50	°C

Tabulka 6. Vstupní hodnoty věž č. 3

5.5.2. Výpočty

Tabulka vypočtených hodnot			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Hmotnostní tok vstupního vlhkého vzduchu	M_2v	37 442,18	kg/h
Potřebný tepelný výkon	Q_2v	592,67	kW
Ušetřené množství ostré 3bar. páry	Mp_3bar	955,48	kg/h
Potřebné množství brýdové páry	Mp_1bar	1 055,00	kg/h
Ušetřené množství chladicí vody	V_1	111 861,74	m3/rok

Tabulka 7. Vypočtené hodnoty věž č. 3

6. Stanovení a vyčíslení možných úspor

Ceny vyskytující se v práci jsou jak v eurech, tak v korunách českých. Následně důležité ceny jsou vyčísleny i v korunách českých. Měnový kurz použitý v práci činí 24 Kč za euro. Kurz odpovídá kurzu z doby vzniku práce (2023/2024).

6.1. Vytipování druhů úspor

V rámci práce jsme vytipovali tři druhy možných finančních úspor. Možné varianty finančních úspor poté poslouží pro kvalifikovaný odhad návratnosti investice.

a) Úspora ostré 3barové páry

První varianta úspor spočívá v tom, že veškeré teplo na předehřev vzduchu bude dodáno z odpadní brýdové páry. Ušetřené množství ostré 3barové páry se nemusí vyrobit.

b) Výroba elektrické energie z uspořené tepelné energie

Závod papírny Mondi disponuje protitlakou a kondenzační turbínou pro výrobu elektrické energie pro závod. Při přebytku nebo při výhodné ceně se elektřina prodává do sítě. Druhá varianta uvažuje, že ušetřené množství tepla, které by nemuselo jít na papírenský stroj PM5, lze využít k výrobě elektřiny. V této variantě rozlišujeme dvě cenovky za silovou elektřinu. Jedna cenovka je za přeprodej MWh elektrické energie mezi středisky závodu. Druhá cenovka je za prodej elektrické energie do sítě. Závod většinou nespotřebuje veškerou elektrickou energii, kterou dokáže vyrobit. Přebytky se následně přeprodávají do sítě za vyšší cenu. Papírna disponuje velkým množstvím odpadu z výroby, který lze přeměnit na tepelnou, či elektrickou energii (regenerace černého louhu, kůra, zbylá štěpka a další vedlejší produkty). Díky instalovaným zařízením na výrobu elektrické energie a levnému palivu se prodej elektrické energie stává další možnou obchodovatelnou komoditou. Obě varianty cen budou pro zjednodušení počítány samostatně. Následně bude přihlédnuto ke skutečnosti, že ne vždy se veškerá elektrická energie přeprodá do sítě.

c) Úspora chladicí vody pro kondenzaci brýdové páry

Jelikož by odpadní brýdová pára byla využita při předehřevu vzduchu, ušetřila by se chladicí voda nutná pro její kondenzaci a následné zchlazení na předepsanou teplotu.

6.2. Úspora ostré 3barové páry

V rámci práce byla odhadnuta cena výroby 3barové páry (cena viz příloha 1). Pro získání celkových finančních úspor jsme danou cenu vynásobili potřebným množstvím tepla na přehřev vzduchu na daných věžích.

Potřebné teplo za rok:

$$Q_r = \frac{Q_{zv} \cdot 8\,000 \cdot 3\,600}{1\,000\,000} = 12\,634 \text{ GJ}$$

Cenová úspora za rok:

$$U_a = Q_r \cdot 10,13 = 127\,924 \text{ EUR/rok}$$

- Modelový výpočet je proveden pro věž č. 1.

6.3. Výroba elektrické energie z uspořené tepelné energie

Pro výpočet výroby elektrické energie bylo zavedeno zjednodušení. Cena páry je uvedena pouze za GJ a neřeší se tlak páry. Aby se tento typ úspory dal lépe porovnat s variantou výroby elektrické energie, nebrali jsme v potaz tlak páry. Množství tepla v páře bylo pouze vynásobeno teoretickou účinností přeměny.

Kondenzační turbína pracuje na známých parametrech. Vypočtením termodynamické účinnosti a započtením ztrát na generátoru, spojce a turbíně získáme teoretickou účinnost přeměny. Vynásobením účinnosti a ušetřené tepelné energie získáme teoretické množství vyrobené elektrické energie. Vynásobením vyrobené elektrické energie cenovkami energií získáme finanční benefit.

V rámci práce byla odhadnuta cena elektrické energie pro firemní účely (cena viz příloha 1).

Cena elektrické energie za prodej do sítě byla vzata z ceníku ČEZ (cena viz příloha 1).

Pro zjednodušení výpočtu byly odhadnuty účinnosti turbíny, generátoru a mechanické spojky. Účinnost kotle nemusíme do výpočtu zahrnovat, jelikož v úvahách počítáme s již vyrobenou párou.

Tabulka pracovních parametrů			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Admisní tlak	P_a	3,69	MPa
Admisní teplota	T_a	443,00	°C
Emisní tlak	P_e	8,60	kPa
Účinnost turbíny	η_T	0,95	-
Účinnost generátoru	η_g	0,98	-
Účinnost mechanické spojky	η_m	0,99	-

Tabulka 8. Pracovní parametry kondenzační turbíny

6.3.1. Výpočet termodynamické účinnosti

Termodynamická účinnost byla vypočtena pomocí CoolProp tabulek vody a vodní páry.

Admisní entalpie:

$$h_a = f(p_a, T_a) = 3\,319 \text{ kJ/kg}$$

Admisní entropie:

$$S_a = f(p_a, T_a) = 6,96 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Adiabatická emisní entalpie:

$$h_{e_{ad}} = f(p_e, S_a) = 2\,185 \text{ kJ/kg}$$

Emisní entalpie:

$$h_e = h_a - \eta_T \cdot (h_a - h_{e_{ad}}) = 2\,242 \text{ kJ/kg}$$

Kondenzační entalpie:

$$h_k = f(p_e, Q = 0) = 179,6 \text{ kJ/kg}$$

Termodynamická účinnost kondenzační turbíny:

$$\eta_{tr} = \frac{h_a - h_e}{h_a - h_k} = 0,343$$

Celková účinnost:

$$\eta_c = \eta_{tr} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_m = 0,333$$

Vyrobené množství elektrické energie za rok:

$$Q_e = Q_r \cdot \eta_{tr} = 1\,168,13 \text{ MWh/rok}$$

Finanční zisk za rok:

$$Z_{eA} = Q_e \cdot 55,8 = 65\,220 \text{ EUR/rok}$$

$$Z_{eB} = Q_e \cdot 167 = 194\,687 \text{ EUR/rok}$$

- Modelový výpočet je proveden pro věž č. 1.

6.4. Úspora vody pro kondenzaci brýdové páry

V rámci práce byla odhadnuta cena průmyslové vody, která je potřebná pro kondenzaci (cena viz příloha 1). Pro získání celkových finančních úspor bylo množství vody potřebné ke kondenzaci brýdové páry na danou teplotu vynásobeno cenou za vodu.

Hmotnostní průtok:

$$M_l = \frac{Q_{2v}}{c_{p_l} \cdot (t_{l_{in}} - t_{l_{out}})} \cdot 3600 = 9\,632,67 \text{ kg/h}$$

Q_{2v} tepelný výkon mařené brýdové páry výpočet kapitola 3

Objemový průtok:

$$V_l = \frac{M_l \cdot 8\,000}{\rho_l} = 76\,129,6 \text{ m}^3/\text{rok}$$

Cenová úspora za rok:

$$U_v = V_l \cdot 0,34 = 25\,376 \text{ EUR/rok}$$

- Modelový výpočet je proveden pro věž č. 1.

6.5. Vyčíslení úspor jednotlivých variant věže č. 1

6.5.1. Úspora A (úspora ostré 3barové páry)

Úspora ostré 3barové páry			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Ušetřené teplo za rok	Q_r	12 634	GJ/rok
Cena výroby 3bar. páry	-	10,13	EUR/GJ
Cenová úspora za rok	U_a	127 924	EUR/rok

Tabulka 9. Úspora ostré 3barové páry věž č. 1

6.5.2. Úspora B (výroba elektrické energie z uspořené tepelné energie)

Výroba elektrické energie z uspořené tepelné energie			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Vyrobená elektrická energie	Q_e	1 168,13	MWh/rok
Varianty B1 elektřina do závodu			
Cena EL do závodu	-	55,83	EUR/MWh
Finanční zisk	-	65 220	EUR/rok
Varianty B2 elektřina do sítě			
Cena EL do sítě	-	166,67	EUR/MWh
Finanční zisk	-	194 687	EUR/rok

Tabulka 10. Vyrobená elektrická energie a uspořená tepelná energie věž č. 1

6.5.3. Úspora C (úspora vody pro kondenzaci brýdové páry)

Úspora vody pro kondenzaci brýdové páry			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Množství uspořené pr. vody	V_l	76 129,60	m ³ /rok
Cena pr. vody	-	0,33	EUR/m ³
Cenová úspora za rok	-	25 376	EUR/rok

Tabulka 11. Úspora vody pro kondenzaci brýdové páry věž č. 1

6.6. Vyčíslení úspor jednotlivých variant věže č. 2

6.6.1. Úspora A (úspora ostré 3barové páry)

Úspora ostré 3barové páry			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Ušetřené teplo za rok	Q_r	27 741,29	GJ/rok
Cena výroby 3bar. páry	-	10,13	EUR/GJ
Cenová úspora za rok	U_a	280 880	EUR

Tabulka 12. Úspora ostré 3barové páry věž č. 2

6.6.2. Úspora B (výroba elektrické energie z uspořené tepelné energie)

Výroba elektrické energie z uspořené tepelné energie			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Vyrobena elektrická energie	Q_e	2 564,82	MWh/rok
Varianty B1 elektřina do závodu			
Cena EL do závodu	-	55,83	EUR/MWh
Finanční zisk	-	143 202	EUR/rok
Varianty B2 elektřina do sítě			
Cena EL do sítě	-	166,67	EUR/MWh
Finanční zisk	-	427 470	EUR/rok

Tabulka 13. Výroba elektrické energie z uspořené tepelné energie věž č. 2

6.6.3. Úspora C (úspora vody pro kondenzaci brýdové páry)

Úspora vody pro kondenzaci brýdové páry			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Množství uspořené pr. vody	V_l	185 658,67	m ³ /rok
Cena pr. vody	-	0,33	EUR/m ³
Cenová úspora za rok	-	61 886	EUR/rok

Tabulka 14. Úspora vody pro kondenzaci brýdové páry věž č. 2

6.7. Vyčíslení úspor jednotlivých variant věže č. 3

6.7.1. Úspora A (úspora ostré 3barové páry)

Úspora ostré 3barové páry			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Ušetřené teplo za rok	Q_r	17 068,76	GJ/rok
Cena výroby 3bar. páry	-	10,13	EUR/GJ
Cenová úspora za rok	U_a	172 821	EUR

Tabulka 15. Úspora ostré 3barové páry věž č. 3

6.7.2. Úspora B (výroba elektrické energie z uspořené tepelné energie)

Výroba elektrické energie z uspořené tepelné energie			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Vyrobena elektrická energie	Q_e	1 578,09	MWh/rok
Varianty B1 elektřina do závodu			
Cena EL do závodu	-	55,83	EUR/MWh
Finanční zisk	-	88 110	EUR/rok
Varianty B2 elektřina do sítě			
Cena EL do sítě	-	166,67	EUR/MWh
Finanční zisk	-	263 015	EUR/rok

Tabulka 16. Výroba elektrické energie z uspořené tepelné energie věž č. 3

6.7.3. Úspora C (úspora vody pro kondenzaci brýdové páry)

Úspora vody pro kondenzaci brýdové páry			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Množství uspořené pr. vody	V_l	111 861,74	m ³ /rok
Cena pr. vody	-	0,33	EUR/m ³
Cenová úspora za rok	-	37 287	EUR/rok

Tabulka 17. Úspora vody pro kondenzaci brýdové páry věž č. 3

6.8. Popis ideálních scénářů úspor

V kapitole 6.1 byly vytipovány možné typy úspor nebo finančních benefitů, ovšem některé typy úspor se vylučují a nelze uvažovat všechny ve finální částce úspor.

Typy úspor se dají rozdělit do tří ideálních scénářů:

6.8.1. První ideální scénář celkových úspor

První ideální scénář celkových úspor pracuje s variantou úspory A a C. Brýdová pára kompletně nahradí ostrou 3barovou páru na předehřevu vzduchu v rekuperační věži. Množství ušetřené ostré 3barové páry nemusíme vyrobit, což generuje úsporu peněz v hodnotě nákladů na její výrobu. Dále brýdovou páru nemusíme odvádět ze stroje a chladit, což generuje úsporu peněz, které by jinak byly potřebné na nákup průmyslové vody pro kondenzaci a ochlazení vody na potřebnou teplotu.

6.8.2. Druhý ideální scénář celkových úspor

Druhý ideální scénář celkových úspor pracuje s variantou úspory B1 a C. Brýdová pára kompletně nahradí ostrou 3barovou páru na předehřevu vzduchu v rekuperační věži. Množství ušetřené tepelné energie nemusíme dodat do sušící sekce, ale můžeme ho využít na výrobu elektrické energie. Následným prodejem elektrické energie do závodu generujeme finanční obnos. Dále brýdovou páru nemusíme odvádět ze stroje a chladit, což generuje úsporu peněz, které by jinak byly potřebné na nákup průmyslové vody pro kondenzaci a ochlazení vody na potřebnou teplotu.

6.8.3. Třetí ideální scénář celkových úspor

Třetí ideální scénář celkových úspor pracuje s variantou úspory B2 a C. Třetí scénář je stejný jako druhý scénář s tou změnou, že vyrobenou energii neprodáváme zpět do závodu, ale do sítě.

6.9. Vyčíslení úspor jednotlivých scénářů na papírenském stroji PM5

Papírenský stroj PM5 disponuje třemi rekuperačními věžemi, z nichž věž č. 2 prošla rekonstrukcí v roce 2010 a je v relativně dobrém stavu. Věže č. 1 a 3 jsou původní a současný stav je natolik žalostný, že jejich rekonstrukce je nutná pro funkčnost papírenského stroje PM5. Jelikož věž č. 2 je v dobrém stavu a věže č. 1 a 3 na spadnutí, zaměříme svůj investiční záměr pouze na rekonstrukci věží č. 1 a 3. V následujících tabulkách (6.9.1, 6.9.2 a 6.9.3) jsou vedeny celkové úspory či zisky všech 3 scénářů, se započtením úspor či zisků z věží č. 1 a 3.

6.9.1. Vyčíslení úspor ideálního scénáře č. 1

Celkové úspory věží č. 1 a 3 ideální scénář č. 1			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Ušetřené teplo za rok	Q_r	29 703,31	GJ/rok
Cena výroby 3bar. páry	-	10,13	EUR/GJ
Cenová úspora za rok	U_a	300 746,05	EUR/rok
Množství uspořené pr. vody	V_l	187 991,33	m3/rok
Cena pr. vody	-	0,33	EUR/m3
Cenová úspora za rok	-	62 663,78	EUR/rok
Celková úspora S 1	-	363 409,83	EUR/rok

Tabulka 18. Celkové úspory věží č. 1 a 3 ideální scénář č. 1

6.9.2. Vyčíslení úspor ideálního scénáře č. 2

Celkové úspory věží č. 1 a 3 ideální scénář č. 2			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Vyrobená elektrická energie	Q_e	2 746,22	MWh/rok
Cena EL do závodu	-	55,83	EUR/MWh
Cenová úspora za rok	-	153 330,56	EUR/rak
Množství uspořené pr. vody	V_l	187 991,33	m3/rok
Cena pr. vody	-	0,33	EUR/m3
Cenová úspora za rok	-	62 663,78	EUR/rok
Celková úspora S 2	-	215 994,34	EUR/rok

Tabulka 19. Celkové úspory věží č. 1 a 3 ideální scénář č. 2

6.9.3. Vyčíslení úspor ideálního scénáře č. 3

Celkové úspory věží č. 1 a 3			
Ideální scénář č. 3			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Vyrobená elektrická energie	Q _e	2 746,22	MWh/rok
Cena EL do sítě	-	166,67	EUR/MWh
Cenová úspora za rok	-	457 703,18	EUR/rak
Množství uspořené pr. vody	V _l	187 991,33	m ³ /rok
Cena pr. vody	-	0,33	EUR/m ³
Cenová úspora za rok	-	62 663,78	EUR/rok
Celková úspora S 3	-	520 366,96	EUR/rok

Tabulka 20. Celkové úspory věží č. 1 a 3 ideální scénář č. 3

6.9.4. Diskuse výsledků

Podle finančního vyčíslení úspor všech tří ideálních scénářů, vychází scénář číslo 3 s roční úsporou 520 366 EUR/rok nejlépe. Výše této úspory je dána vyšší výkupní cenou elektrické energie. Oproti tomu scénář číslo 2, který počítá s přeprodejem elektrické energie v závodě, přináší roční úsporu 215 994 EUR/rok. Tato úspora je také nejnižší ze všech tří scénářů. V 1. scénáři, který počítá s úsporou nevyrobené ostré 3barové páry, vychází roční úspora 363 409 EUR/rok.

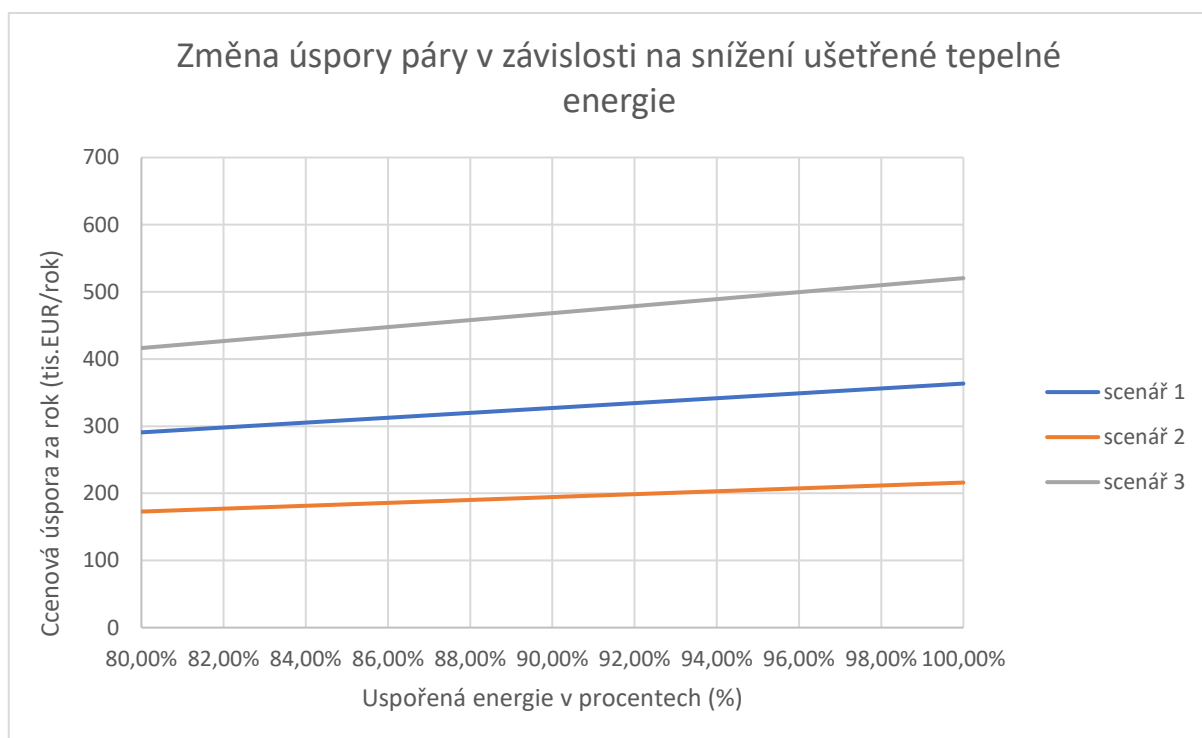
Definované tři scénáře jsou ideální scénáře, které by mohly nastat. V reálném provozu můžeme předpokládat, že se scénáře mohou během roku střídát a některé vstupní parametry použité při výpočtu s časem měnit. Konkrétně se jedná o ceny tepla a elektrické energie. Závislost vstupních parametrů na výsledcích ročních úspor je dále rozebrána v kapitole 7 Citlivostní analýza. Problematika střídání ideálních scénářů je dále rozebrána v kapitole 8 Ekonomické hodnocení.

7. Citlivostní analýza

Při výpočtech reálných úspor byly zafixovány některé vstupní parametry, konkrétně ceny energií, vody a množství ušetřené ostré 3barové páry, které se mohou s časem měnit. Úkolem této kapitoly je zjistit, do jaké míry má daný vstupní parametr vliv na celkový výsledek.

7.1. Uspořené ostrá 3barová pára

Při výpočtech ideálních scénářů byl zafixován parametr úspory ostré 3barové páry na 100 %. To znamená, že papírenský stroj dokáže vyprodukovat takové množství brýdové páry, která pokryje přehřev veškerého vzduchu na 105 °C. Tento předpoklad ovšem v reálném provozu nemusí nastat vždy. Množství vyprodukované brýdové páry závisí na několika faktorech. Mezi faktory patří například druh aktuálně vyráběného papíru a aktuální výkon papírenského stroje. Množství vyprodukované brýdové páry se odhaduje na 1 500 až 2 000 kg/h. Odhadovaná potřeba se pohybuje okolo 1 750 kg/h. V následujícím grafu (obr. 52) je model uspořené částky všech tří ideálních scénářů v závislosti na změně uspořené ostré 3 barové páry od 100 % do 80 %. Přičemž 80 % uspořené ostré 3barové páry cca odpovídá nejnižší odhadované hodnotě produkované brýdové páry.



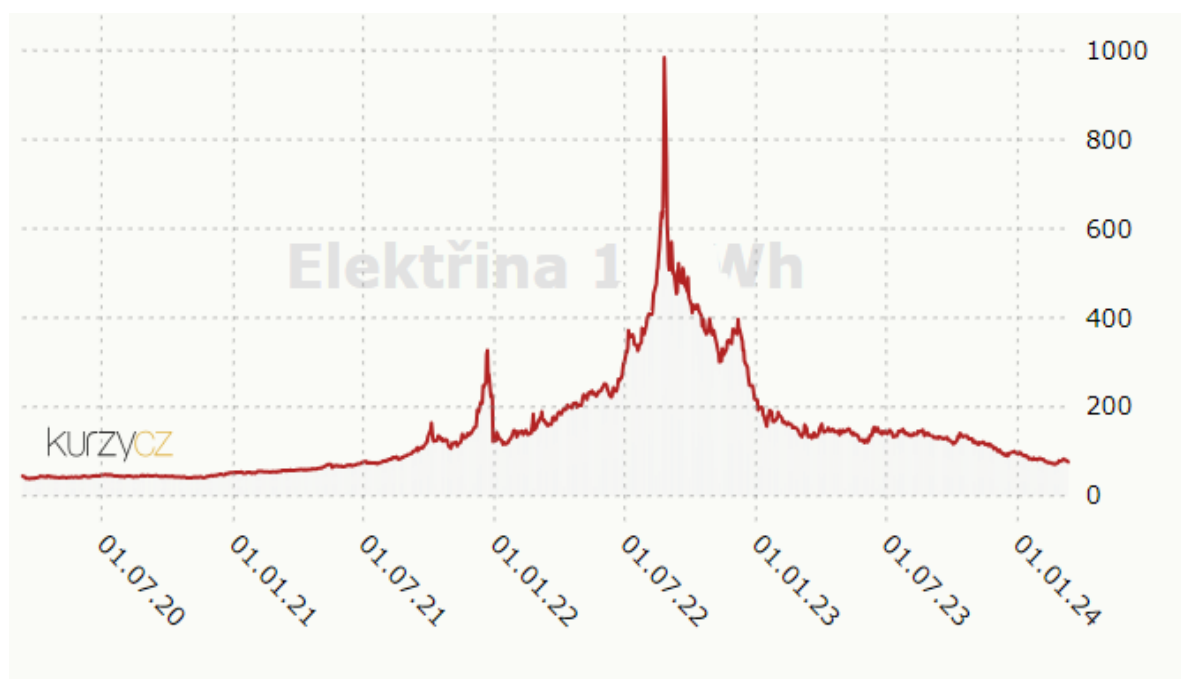
Obr. 52. Změna úspory páry v závislosti na snížení ušetřené tepelné energie

Model ukazuje snižující se úspory se snižujícím se množstvím ušetřené ostré 3barové páry. Největší snížení uspořené částky, při 80 % úspory, bylo zaznamenáno u scénáře 3, a to o 104 tis. EUR z původní částky 520 tis. EUR. Naopak nejmenší snížení je u scénáře 2, a to o 43 tis. EUR z původní částky 215 tis. EUR. U 1. scénáře je snížení o 72 tis. EUR z původní částky 363 tis. EUR. Největší vliv na klesající úspory ostré 3barové páry má scénář 1, kterému za každý procentní bod klesá úspora o 5,2 tis. EUR. 2. scénáři o 2,1 tis. EUR a 3. scénáři o 3,6 tis. EUR.

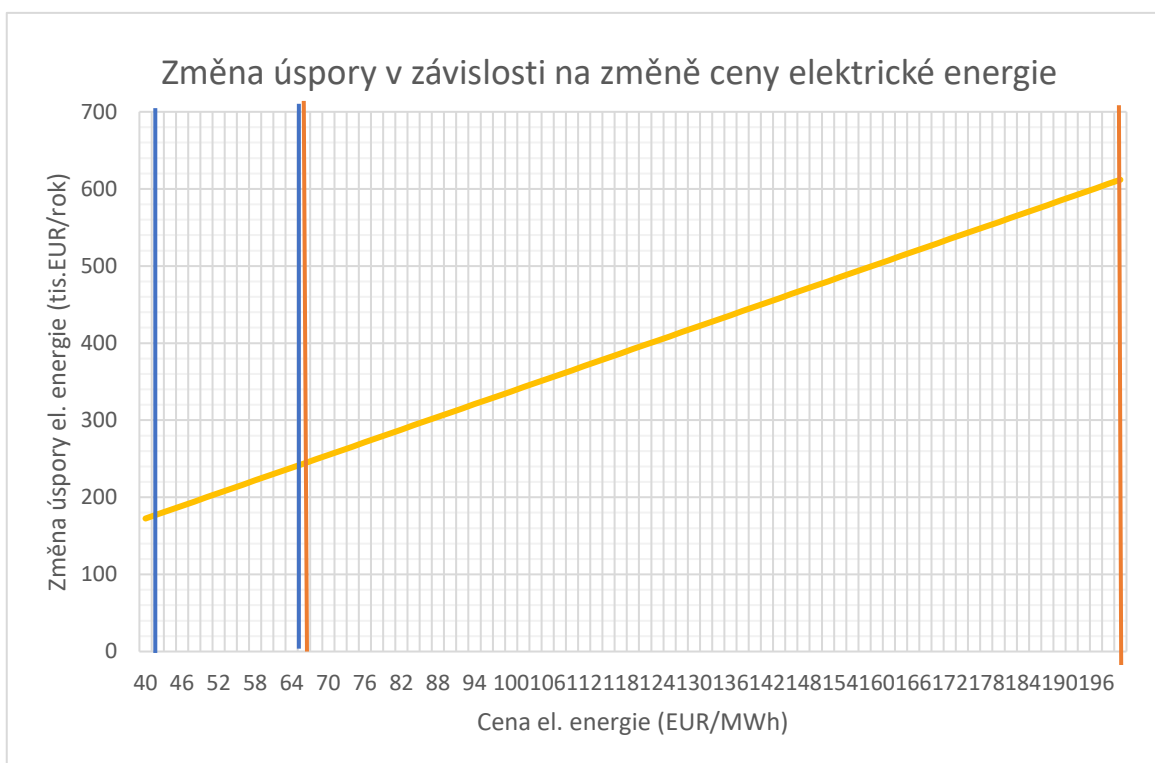
7.2. Cena elektrické energie

Cena elektrické energie (dále jen EL) hraje zásadní roli ve výsledných úsporách ve scénáři 2 a 3. U scénáře 2 byla výkupní cena EL zafixována na dané hodnotě (Příloha 1). Cena elektrické energie ve fabrice se stanovuje na každý rok. Z dat pohybu výkupní ceny ve fabrice (Příloha 2) pozorujeme malou změnu ceny během let.

U scénáře 3 byla cena EL zafixována na 166,67 EUR/MWh. Tato cena odpovídá ceníku silové elektřiny ČEZ z roku 2023. Cena EL v posledních 4 letech prodělala prudké nárůsty a velké výkyvy, což dokazuje graf průběhu ceny EL mezi lety 2020 až 2024 (obr. 54). Cena EL začala vlivem politického, ekonomického a globálního dění zdražovat a prudce kolísat. Z téměř konstantní ceny 30-40 EUR/MWh náhle zdražila v roce 2022 až na 400 EUR/MWh. V roce 2023 se cena pohybovala mezi 200 až 100 EUR/MWh s klesající tendencí. Vlivem stále probíhajících politických a ekonomických změn se nedá s dostatečnou přesností predikovat cena EL na budoucí roky. Z tohoto důvodu je scénář 3 velice náchylný na změnu ceny EL. Vliv ceny EL na celkové úspory scénáře 2 a 3 ukazuje graf (obr. 53).



Obr. 53. Průběh ceny elektrické energie v EUR/MWh [38]



Obr. 54. Graf změny úspory v závislosti na změně ceny elektrické energie

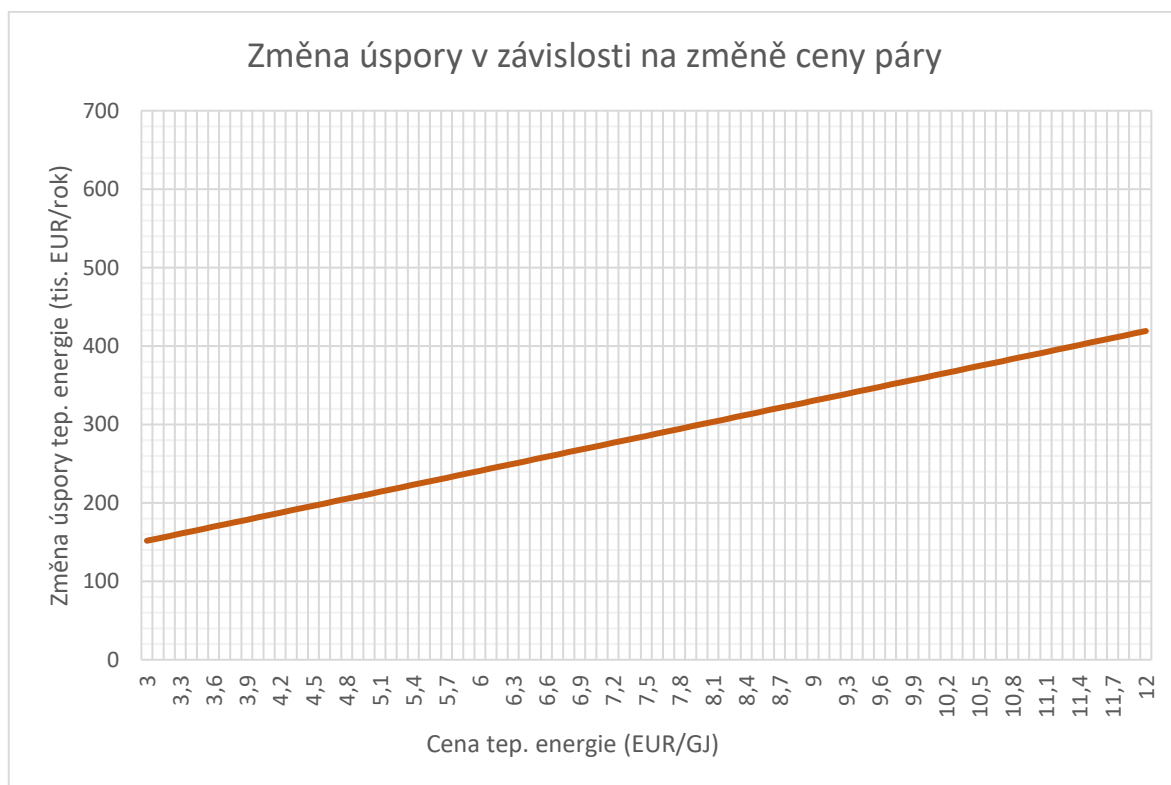
Na grafu (obr. 53) pozorujeme změnu ročních úspor se změnou ceny elektrické energie od 40 EUR/MWh po cenu 200 EUR/MWh. Tyto okrajové podmínky byly stanoveny ze znalosti ceníku EL papírny a průběhu ceny EL v předchozích letech. Modré úsečky vyznačují rozmezí pohybu ceny EL předprodávané po závodě. Při ceně 40 EUR/MWh je celková úspora 172 tis. EUR/rok a při ceně 60 EUR/MWh je roční úspora 227 tis. EUR/rok. Rozdíl mezi hodnotami je 55 tis. EUR/rok. Vývoj ceny EL ve fabrice se předpokládá mezi 50 a 60 EUR/MWh. Citlivost ceny EL je v tomto případě viditelná, ovšem z hlediska stabilní ceny není dramatická.

Oranžová výseč znázorňuje možné kolísání ročních úspor ve scénáři 3 v závislosti na ceně EL. Mezní body byly stanoveny na základě zmíněných zkušeností. Při ceně 60 EUR/MWh je roční úspora 227 tis. EUR/rok a při ceně 200 EUR/MWh je roční úspora 612 tis. EUR/rok. Rozdíl mezi hodnotami je 385 tis. EUR. Citlivost ceny EL je v tomto případě dramatická a je potřeba ji brát v úvahu.

7.3.Cena páry

Cena tepla ve formě páry hraje zásadní roli ve výsledných úsporách ve scénáři 1. Cenu páry ve fabrice jsme zafixovali na dané hodnotě (Příloha 1). Cena Páry ve fabrice se stanovuje na každý rok. Z dat pohybu ceny ve fabrice (Příloha 2) je vidět přibližná konstantní cena mezi lety 2013 a 2021. Mezi lety 2022 a 2023 došlo k výraznému zdražení cca o 65 %. Další velké zdražení už se nepředpokládá.

Na grafu (obr. 55) pozorujeme změnu ročních úspor se změnou ceny páry od 3 EUR/GJ po cenu 12 EUR/GJ. Tyto okrajové podmínky byly stanoveny ze znalosti ceníku páry papírny a průběhu ceny páry v předchozích letech. Při ceně 6 EUR/GJ, která panovala v předešlých letech, by roční úspora činila 240 tis. EUR/rok. Aktuální cena 10,13 EUR/GJ přináší roční úsporu 363 tis. EUR/GJ. Při aktuálním trendu by se cena páry mohla do pár let vyšplhat na 12 EUR/GJ. Při této ceně páry by úspora činila 419 EUR/rok. Rozdíl mezi krajními cenami 6 a 12 EUR/GJ je 193 tis. EUR. Z těchto dat vidíme značnou závislost ceny páry na celkových úsporách scénáře 1. Předpoklady vývoje ceny páry už nepočítají s dramatickým nárůstem ceny, pouze postupným zvyšováním maximálně o jednotky EUR.

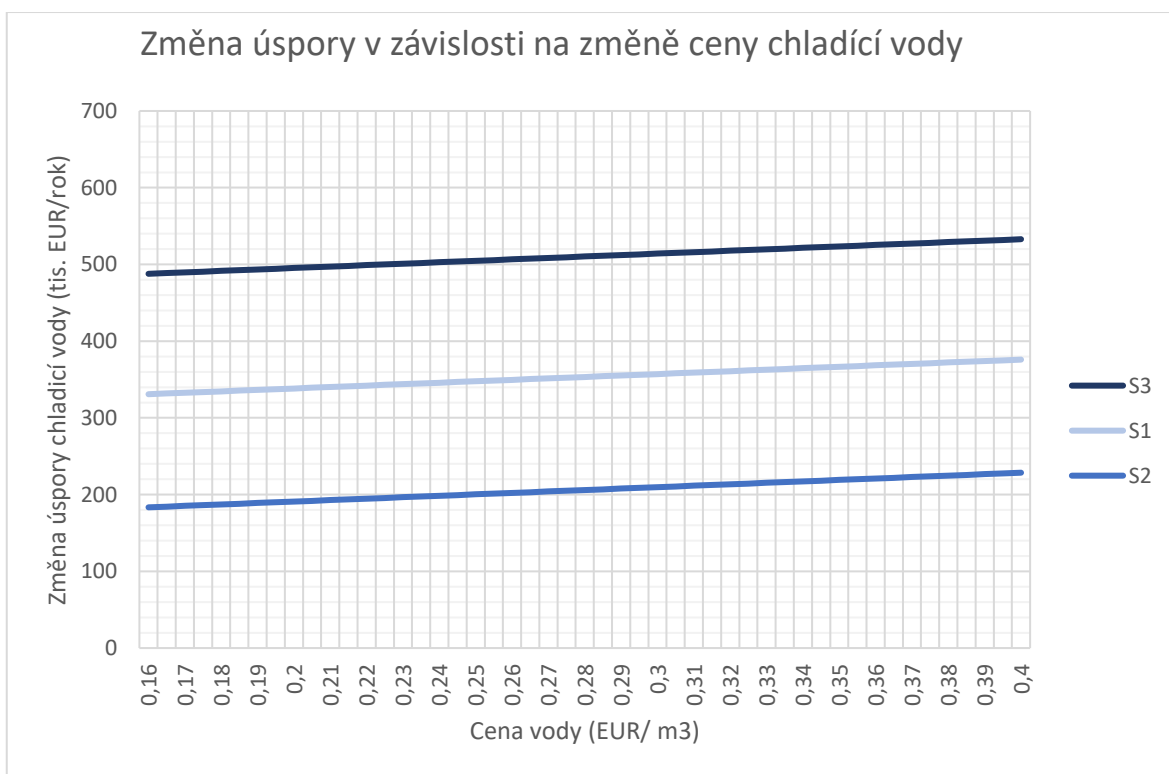


Obr. 55. Graf změny úspory v závislosti na změně ceny páry

7.4.Cena vody

Cena chladící vody se propisuje do všech tří scénářů. Cenu vody ve fabrice jsme zafixovali na dané hodnotě (Příloha 1). Cena vody ve fabrice se stanovuje na každý rok. Z dat pohybu ceny ve fabrice (Příloha 2) pozorujeme lehký konstantní nárůst ceny mezi lety 2014 až 2020 a lehce strmější mezi lety 2021 až 2023. Předpoklady počítají pouze s mírnými nárůsty cen, jako tomu bylo v letech 2014 až 2020.

Na grafu (obr. 56) pozorujeme změnu ročních úspor se změnou ceny chladící vody od 0,16 EUR/m³ po cenu 0,4 EUR/m³. Tyto okrajové podmínky byly stanoveny ze znalosti ceníku chladící vody papírny a průběhu ceny chladící vody v předchozích letech. Rozdíl ve všech scénářích (mezi nejnížší zaznamenanou cenou 0,18 EUR/m³ a předpokládanou možnou cenou za pár let 0,4 EUR/m³) je 41 tis. EUR/rok. To je z pohledu hodnocení nejnížší rozdíl. Z těchto dat vyplývá, že trend růstu ceny vody sice pomůže v návratnosti investice, ale nemá na ni takový dopad jako jiné proměnné parametry.

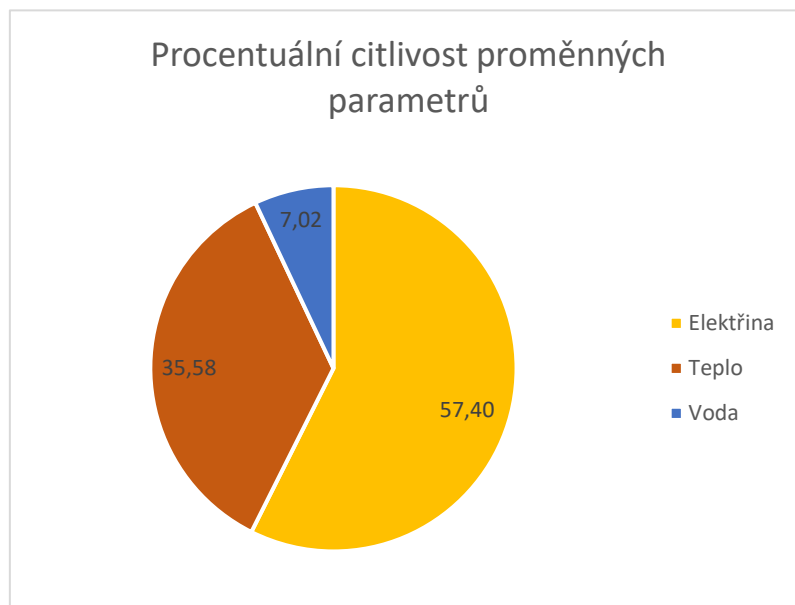


Obr. 56. Graf změny úspory v závislosti na změně ceny chladící vody

7.5. Diskuze výsledků

Z citlivostní analýzy vyplývá, že největší vliv na návratnosti investice má cena EL a po ní cena tepla ve formě páry. Cena vody má sice vliv na celkové roční úspory, ale z relativního hlediska nejmenší ze všech zkoumaných parametrů. Závislost těchto tří parametrů na celkové roční úspoře ukazuje graf (obr. 57). Další zkoumanou proměnnou bylo množství ušetřené páry. Kolísání úspory páry v roce ovlivňuje úsporu o trochu více než změna ceny vody.

Dále z citlivostní analýzy vyplynulo, že nejvíce proměnný scénář je scénář 3. Scénáře 2 a 1 jsou zase naopak relativně stabilní.



Obr. 57. Procentuální citlivost proměnných parametrů (žlutá – elektřina, oranžová – teplo, modrá – voda)

8. Ekonomické zhodnocení

V této kapitole se zaměříme na ekonomické hodnocení celé investice. Z předchozích kapitol (6 a 7) máme zpracované ideální scénáře úspor a jejich citlivost na změnu okrajových podmínek. Pomocí těchto dat jsme sestavili tři reálné scénáře (optimistický, realistický a pesimistický). Tyto scénáře vycházejí z ideálních scénářů, ovšem je u nich zohledněn reálný provoz papírny a chování okrajových podmínek podle charakteru scénáře.

8.1. Popis reálných scénářů

8.1.1. Optimistický scénář

Optimistický scénář počítá se 100% množstvím uspořené páry (papírenský stroj vyprodukuje takové množství brýdové páry, která uspokojí poptávku tepla na předeřtání vzduchu). Dále scénář počítá s výkupní cenou silové elektřiny do sítě v hodnotě 166 EUR/MWh a s cenou za chladicí vodu v hodnotě 0,34 EUR/m³.

8.1.2. Realistický scénář

Realistický scénář počítá s 95% množstvím uspořené páry. Z důvodu predikce ceny silové elektřiny na následující roky [38], která by se měla pohybovat okolo 75-80 EUR/MWh, se nevyplatí z ušetřené páry vyrábět elektřinu. Z tohoto důvodu realistický scénář pracuje s variantou nevyrobení ušetřené páry, která stojí 10,13 EUR/GJ. Dále scénář počítá s cenou za chladicí vodu v hodnotě 0,34 EUR/m³.

8.1.3. Pesimistický scénář

Pesimistický scénář počítá s 80% množstvím uspořené páry, s variantou finančního zisku, který vznikne nevyrobením uspořené páry v hodnotě 10,13 EUR/GJ a s cenou za chladicí vodu v hodnotě 0,34 EUR/m³.

8.2. Vyčíslení realistických scénářů

8.2.1. Optimistický scénář

Optimistický scénář			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Relativní množství ušetřeného tepla	-	100,00	%
Ušetřené teplo za rok	Q _r	29 703,31	GJ/rok
Vyrobena elektrická energie	Q _e	2 746,22	MWh/rok
Cena EL do sítě	-	166,67	EUR/MWh
Cenová úspora za rok	-	457 703,18	EUR/rok
Množství uspořené pr. vody	V _I	187 991,33	m ³ /rok
Cena pr. vody	-	0,34	EUR/m ³
Cenová úspora za rok	-	63 917,05	EUR/rok
Celková úspora OS	-	521 620	EUR/rok
Celková úspora OS	-	12 518 880	Kč/rok

Tabulka 21. Optimistický scénář

8.2.2. Realistický scénář

Realistický scénář			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Relativní množství ušetřeného tepla	-	95,00	%
Ušetřené teplo za rok	Q _r	28 218,15	GJ/rok
Cena výroby páry	-	10,13	EUR/GJ
Cenová úspora za rok	-	285 708,75	EUR/rok
Množství uspořené pr. vody	V _I	178 591,77	m ³ /rok
Cena pr. vody	-	0,34	EUR/m ³
Cenová úspora za rok	-	60 721,20	EUR/rok
Celková úspora RS	-	346 430	EUR/rok
Celková úspora RS	-	8 314 080	Kč/rok

Tabulka 22. Realistický scénář

8.2.3. Pesimistický scénář

Pesimistický scénář			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Relativní množství ušetřeného tepla	-	80,00	%
Ušetřené teplo za rok	Q_r	23 762,65	GJ/rok
Cena výroby páry	-	10,13	EUR/GJ
Cenová úspora za rok	-	240 596,84	EUR/rok
Množství uspořené pr. vody	V_l	150 393,07	m ³ /rok
Cena pr. vody	-	0,34	EUR/m ³
Cenová úspora za rok	-	51 133,64	EUR/rok
Celková úspora PS	-	291 730	EUR/rok
Celková úspora RS	-	7 001 532	Kč/rok

Tabulka 23. Pesimistický scénář

8.3. Zhodnocení investice

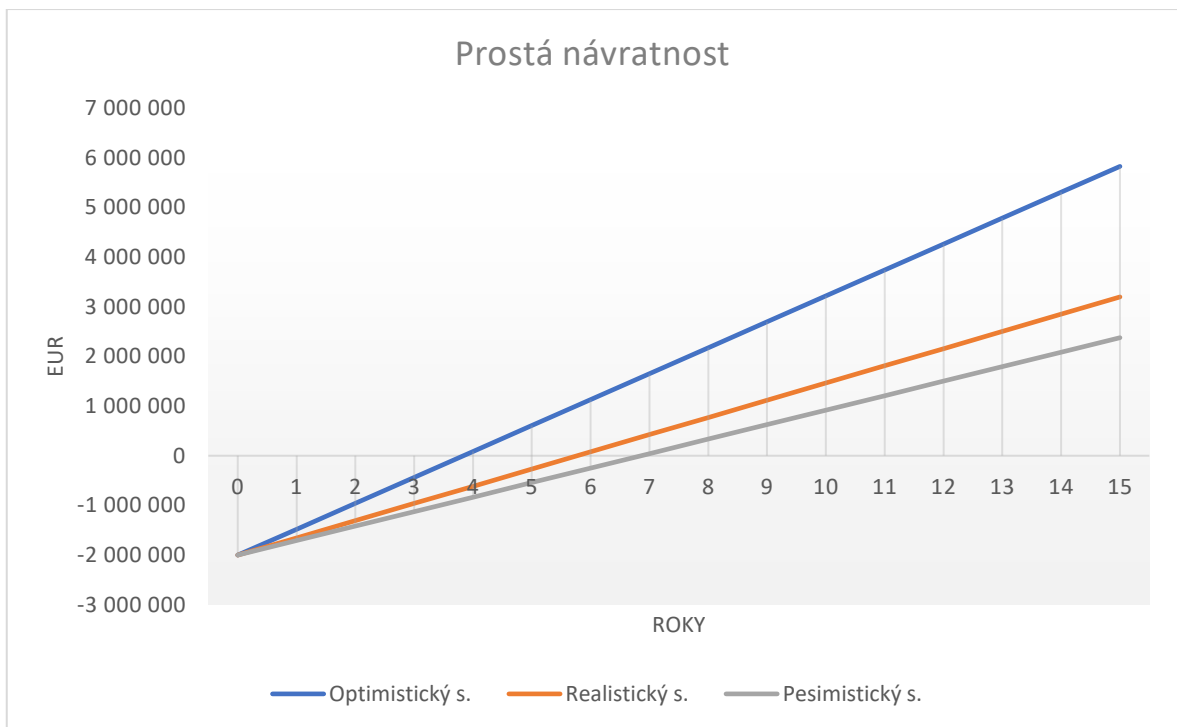
Nový koncept přehřívání vzduchu brýdovou parou je velkým zásahem do celé konstrukce věže. Z tohoto důvodu je nemožné pouze upravit stávající věže a bylo by potřeba udělat věže kompletně nové. Toto rozhodnutí podporuje i fakt, že věže 1 a 3 jsou staré a před rekonstrukcí. Odhad investice celé nové věže je 1 mil. EUR (0,5 mil. technologie a 0,5 mil. demoliční a stavební práce). Celková investice projektu je vyčíslena na **2 000 000 EUR (48 000 000 Kč)**.

8.3.1. Návratnost investice

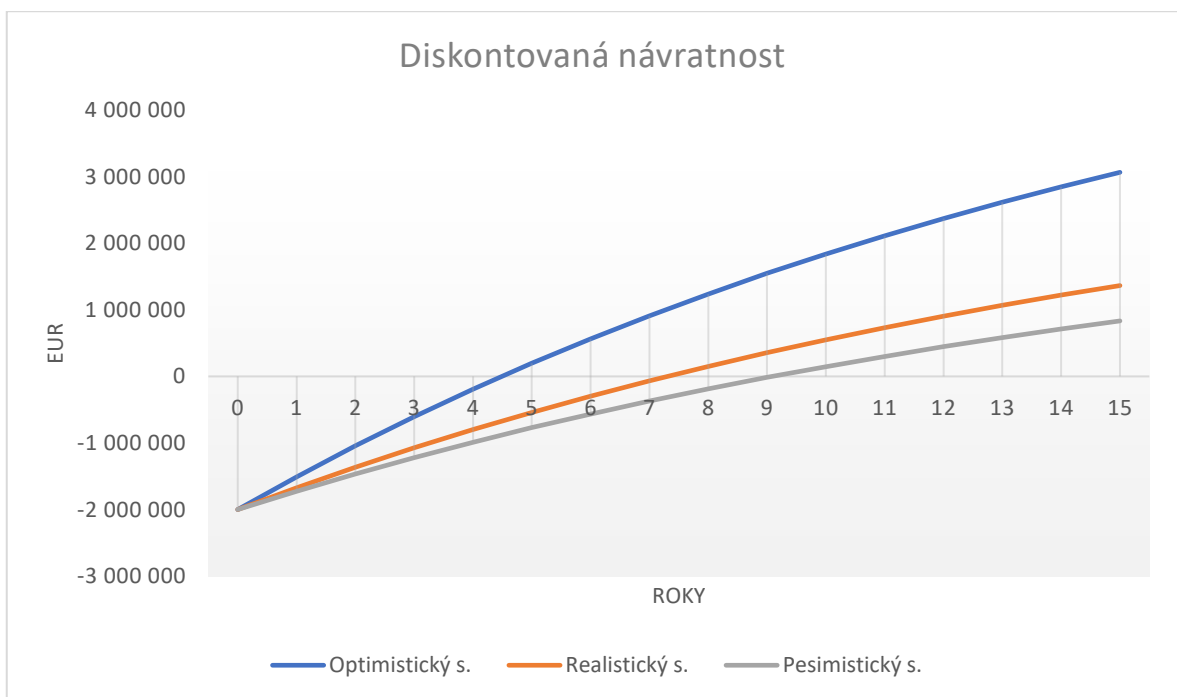
Pro vyčíslení návratnosti investice byla použita metoda prosté návratnosti a diskontované návratnosti. Podle dat ČNB byla inflace stanovena na 3 % a diskontní míra na 9,18 %.

8.3.2. Diskuze výsledků

Z grafů (obr. 58 a 59) pozorujeme, že prostá návratnost optimistického scénáře je cca 4 roky a diskontovaná návratnost 4,5 let. Návratnost realistického scénáře se u prosté návratnosti pohybuje okolo 5,5 let a diskontovaná návratnost 7 let. Při pesimistickém scénáři se prostá návratnost pohybuje do 7 let a diskontovaná do 9 let. Z těchto dat vyplývá, že návratnost investice i při pesimistickém scénáři není špatná a při plánované životnosti věže 20 let se investice vyplatí.



Obr. 58. Graf prosté návratnosti



Obr. 59. Graf diskontované návratnosti

9. Závěr

Na papírenském stroji PM5, papírny Mondi Štětí, v sušící sekci vzniká odpadní brýdová pára. Pára není nijak využívána. Sušící sekce obsahuje tři rekuperační věže, které odvádějí vlhký vzduch a částečně rekuperují teplo do nasávaného nového technologického vzduchu. Na dohřátí vstupního vzduchu na požadovaných 105 °C je používán výměník na ostrou 3barovou páru. Cílem práce je zjistit, jestli se ekonomicky vyplatí věže přestavět tak, aby se na dohřátí vstupního vzduchu používala odpadní brýdová pára a ušetřila se tím ostrá 3barová pára.

Pomocí naměřených vstupních dat na každé věži bylo přes bilanční výpočty vypočteno množství ušetřené ostré 3barové páry (věž č. 1: 740 kg/h, věž č. 2: 1 553 kg/h, věž č. 3: 955 kg/h), množství potřebné brýdové páry (věž č. 1: 718 kg/h, věž č. 2: 1 751 kg/h, věž č. 3: 1 055 kg/h), a množství chladicí vody (věž č. 1: 76 123 m³/rok, věž č. 2: 185 659 m³/rok, věž č. 3: 111 863 m³/rok). Z důvodu nedávné rekonstrukce věže 2 bylo rozhodnuto vztáhnout rekonstrukční záměr pouze na věže č. 1 a 3. Celkové množství ušetřené ostré 3 barové páry tedy činí 1 695 kg/h (29 703 GJ/rok), potřebné množství brýdové páry činí 1 773 kg/h a množství chladicí vody činí 187 991 m³/rok.

Pro zhodnocení finančních úspor byly vytipovaný tři druhy možných finančních úspor: úspora ostré 3barové páry, úspora vody pro kondenzaci brýdové páry, a jelikož papírna disponuje kondenzační turbínou, tak i výroba elektrické energie z uspořené tepelné energie. Z těchto 3 druhů finančních úspor byly vytvořeny 3 ideální scénáře možných finančních úspor. Celkové roční úspory ideálního scénáře č. 1 byly vyčísleny na 363 410 EUR/rok (8 721 836 Kč/rok), ideálního scénáře č. 2 na 215 994 EUR/rok (5 183 864 Kč/rok) a ideálního scénáře č. 3 na 520 367 EUR/rok (12 488 808 Kč/rok).

Citlivostní analýza byla zaměřena na citlivost zafixovaných cen a jejich dopad na změnu celkových úspor za rok v ideálních scénářích. V úvahu byly brány i trendy pohybu cen. Z výsledků citlivostní analýzy vyplynulo, že scénář č. 3 je nejvíce citlivý na počáteční podmínky a její charakter je nestálý. Zato ideální scénáře č. 1 a 3 jsou sice citlivé na změnu počátečních podmínek, ale jejich chování je stabilní.

Ze znalostí výsledků ideálních scénářů a jejich citlivostní analýzy byly vytvořeny 3 realistické scénáře návratnosti investice (optimistický, realistický a pesimistický). Pro hodnocení návratnosti investice byly použity metody prosté návratnosti a diskontované návratnosti (diskontní míra byla stanovena na 9,18 %). Celková cena investice byla vyčíslena na 2 mil. EUR (48 mil. Kč). Optimistický scénář počítá s roční úsporou 521 620 EUR/rok (12 518 886 Kč/rok), prostá návratnost vychází cca 4 roky a diskontovaná cca 4,5 roku. Realistický scénář počítá s roční úsporou 346 420 EUR/rok (8 314 080 Kč/rok), prostá návratnost vychází na cca 5,5 let a diskontovaná na cca 7 let. Pesimistický scénář počítá s roční úsporou 291 730 EUR/rok (7 001 520 Kč/rok), prostá návratnost vychází cca 7 let a

diskontovaná cca 9 let. Z těchto dat vyplývá, že návratnost investice, i při pesimistickém scénáři, není špatná a při plánované životnosti věže 20 let se investice vyplatí.

Literatura

- [1] *Jak se dělá papyrus* [online]. [vid. 2023-10-02]. Dostupné z: <http://www.people.cz/travel/cs/articles-detail/aid-11325>
- [2] KAŠPÁRKOVÁ, Mgr Lenka. Papír, historie jeho výroby a ruční výroba papíru. nedatováno.
- [3] *Pergamen – Encyklopedie knihy* [online]. [vid. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://encyklopedieknihy.cz/index.php/Pergamen>
- [4] Historie výroby papíru. *Ateliér Manufactura - ruční papír*. [online]. [vid. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.ateliermanufactura.com/historie-vyroby-papiru/>
- [5] *Historie výroby papíru – Cesta papíru z Číny do Čech | MeziStromy.cz* [online]. [vid. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.mezistromy.cz/materialy-na-bazi-dreva/historie-vyroby-papiru>
- [6] *Historie výroby papíru – Suroviny k výrobě papíru v průběhu staletí | MeziStromy.cz* [online]. [vid. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.mezistromy.cz/materialy-na-bazi-dreva/suroviny-k-vyrobe-papiru-v-prubehu-staleti/odborny>
- [7] GRUNTORAD, Tomáš. Historie papíru. *Papír Novák* [online]. 26. únor 2021 [vid. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://papir-novak.cz/aktuality/historie-papiru/>
- [8] Historie výroby papíru ve světě a v ČR | MAGAZÍN.cz. *MAGAZÍN.cz | Internetový magazín* [online]. [vid. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://magazin.cz/pro-muze/13914-historie-vyroby-papiru-ve-svete-a-v-cr>
- [9] *Papír (technologie) – Encyklopedie knihy* [online]. [vid. 2023-10-10]. Dostupné z: [https://www.encyklopedieknihy.cz/index.php?title=Pap%C3%ADr_\(technologie\)](https://www.encyklopedieknihy.cz/index.php?title=Pap%C3%ADr_(technologie))
- [10] *Holandr – Encyklopedie knihy* [online]. [vid. 2023-10-15]. Dostupné z: <https://www.encyklopedieknihy.cz/index.php?title=Holandr>
- [11] *Stoupa – Encyklopedie knihy* [online]. [vid. 2023-10-15]. Dostupné z: <https://www.encyklopedieknihy.cz/index.php?title=Stoupa>
- [12] *Čerpací forma – Encyklopedie knihy* [online]. [vid. 2023-10-15]. Dostupné z: https://www.encyklopedieknihy.cz/index.php?title=%C4%8Cerpac%C3%AD_for ma
- [13] *Pušt – Encyklopedie knihy* [online]. [vid. 2023-10-15]. Dostupné z: <https://www.encyklopedieknihy.cz/index.php?title=Pu%C5%A1t>
- [14] *Ruční papírenský lis – Encyklopedie knihy* [online]. [vid. 2023-10-15]. Dostupné z: https://www.encyklopedieknihy.cz/index.php?title=Ru%C4%8Dn%C3%AD_pap%C3%ADrensk%C3%BD_lis

- [15] *Sušení papíru – Encyklopedie knihy* [online]. [vid. 2023-10-17]. Dostupné z: https://www.encyklopedieknihy.cz/index.php?title=Su%C5%A1en%C3%AD_pap%C3%ADru
- [16] *Klížení papíru – Encyklopedie knihy* [online]. [vid. 2023-10-17]. Dostupné z: https://www.encyklopedieknihy.cz/index.php?title=Kl%C3%AD%C5%BEen%C3%AD_pap%C3%ADru
- [17] *Domáci koželužství* [online]. [vid. 2023-10-17]. Dostupné z: <http://www.kozeluzstvi.cz/dalsi-vyuziti-kuze/vyroba-klihu.html>
- [18] *Hlazení papíru – Encyklopedie knihy* [online]. [vid. 2023-10-17]. Dostupné z: https://www.encyklopedieknihy.cz/index.php?title=Hlazen%C3%AD_pap%C3%ADru
- [19] *Výroba buničiny a papíru | MeziStromy.cz* [online]. [vid. 2023-10-25]. Dostupné z: <https://www.mezistromy.cz/materialy-na-bazi-dreva/vyroba-buniciny-a-papiru-/odborny>
- [20] *Vyroba_papiru_a_buniciny_19112015.pdf* [online]. [vid. 2023-10-25]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/sci/podzim2015/C3804/Vyroba_papiru_a_buniciny_19112015.pdf?lang=en
- [21] ČANĚK, Bohuslav. *Výroba papíru: technologie pro 3. roč. stř. prům. škol papírenských : obor : výroba celulózy a papíru. 2.*, nezm. vyd. B.m.: Nakladatelství techn. lit., 1967. Řada papírenské a celulózařské lit.
- [22] *Chemikalie.pdf* [online]. [vid. 2023-11-12]. Dostupné z: <https://www.papcel.cz/UserFiles/File/eshop/7845/Chemikalie.pdf>
- [23] KORDA, Josef. *Papírenská encyklopedie. 1. vyd. B.m.: SNTL, 1992. ISBN 978-80-03-00647-2.*
- [24] MILICHOVSKY, Miloslav. Mechanismus klížení papíroviny ve hmotě klasickými prostředky. *Papir A Celuloza. 1976, 31, 17–21.*
- [25] *Papírenský stroj – Encyklopedie knihy* [online]. [vid. 2024-01-29]. Dostupné z: https://encyklopedieknihy.cz/index.php/Pap%C3%ADrensk%C3%BD_stroj
- [26] KORDA, Josef. *Papírenská encyklopedie. 1. vyd. B.m.: SNTL, 1992. ISBN 978-80-03-00647-2.*
- [27] ČANĚK, Bohuslav. *Výroba papíru: technologie pro 3. roč. stř. prům. škol papírenských : obor : výroba celulózy a papíru. 2.*, nezm. vyd. B.m.: Nakladatelství techn. lit., 1967. Řada papírenské a celulózařské lit.
- [28] ČERVENKA, Karel. *Papírenské stroje* [online]. 2., dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962. Book, Whole. Dostupné z: <https://go.exlibris.link/WJDVmY2h>
- [29] *Drying in paper industry - Efficiency Finder* [online]. [vid. 2024-02-12]. Dostupné z: http://wiki.zero-emissions.at/index.php?title=Drying_in_paper_industry

- [30] *Čína Litinová sušička válce papírenských strojů Výrobci, dodavatelé, továrna - vyrobena v Číně - Bannor* [online]. [vid. 2024-02-12]. Dostupné z: <http://cz.maquinapapel.net/dryer-cylinder-and-press-roll/cast-iron-dryer-cylinder-of-paper-machine.html>
- [31] ENERGYNEST. Energy consumption in the pulp & paper industry. *ENERGYNEST* [online]. 16. květen 2023 [vid. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://energy-nest.com/energy-consumption-pulp-paper-industry/>
- [32] Global paper production volume by type 2022. *Statista* [online]. [vid. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/270317/production-volume-of-paper-by-type/>
- [33] EDELMANN, K., Sakari KAIJALUOTO, Oleg TIMOFEEV, T. SAARENKO, Harri KIISKINEN a M. KARLSSON. *The impact of new paper drying technologies on energy consumption*. 1996.
- [34] Pulp & paper. *IEA* [online]. [vid. 2024-02-21]. Dostupné z: <https://www.iea.org/energy-system/industry/paper>
- [35] Energy Reduction in Pulp and Paper Industry | Ways to Conserve Energy. *Pulp and Paper Technology* [online]. 25. duben 2022 [vid. 2024-02-28]. Dostupné z: <https://www.pulpandpaper-technology.com/articles/energyreduction>
- [36] *Process and Control Today | Improving the efficiency of the pulp and paper industry ~ How can pulp and paper mills make energy savings?* [online]. [vid. 2024-02-28]. Dostupné z: <https://www.pandct.com/news/improving-the-efficiency-of-the-pulp-and-paper-industry-how-can-pulp-and-paper-mills-make-energy-savings/>
- [37] *Industrial waste heat utilization: Heat recovery options in pulp mills* [online]. [vid. 2024-02-28]. Dostupné z: <https://www.gigkarasek.com/blog/industrial-waste-heat-utilization>
- [38] Cena elektřiny. *oEnergetice.cz* [online]. [vid. 2024-03-27]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/energostat/ceny-aktualne/elektrina>

Seznam příloh

Příloha 1: Použité ceny komodit pro ekonomický model DP

Příloha 2: Průběh cen komodit v letech pro ekonomický model DP

Přílohy

Příloha 1: Použité ceny komodit pro ekonomický model DP

Tabulka použitých cen				
Název	Cena	Jednotka	Cena	Jednotka
3barová pára	10,13	EUR/GJ	243,00	Kč/GJ
Elektřina ve fabrice	55,80	EUR/MWh	1 339	Kč/MWh
Elektřina do sítě	166,7	EUR/MWh	4 000	Kč/MWh
Průmyslová voda	0,34	EUR/m3	8	Kč/m3

Příloha 2: Průběh cen komodit v letech pro ekonomický model DP

Ceny elektrické energie prodávané ve fabrice v průběhu let											
Rok	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
EUR/MWh	58,92	54,13	58,75	57,67	47,25	41,17	40,75	38,00	40,21	50,25	55,83

Ceny páry v průběhu let											
Rok	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
EUR/GJ	5,79	5,63	6,96	6,58	6,21	5,33	6,04	6,67	6,42	9,38	10,13

Cena vody v průběhu let											
Rok	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
EUR/m ³	0,21	0,18	0,18	0,20	0,22	0,23	0,23	0,24	0,27	0,29	0,33